

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO

Trabalhos contemplados no Prêmio Sanepar de Tecnologias
Sustentáveis e no Prêmio Inova Sanepar – Edição 2016

Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar
Curitiba – PR
2017

1.^a edição – Tiragem: 200 exemplares

Organizadores:

Bárbara Zanicotti Leite Ross, Charles Carneiro, Gustavo Rafael Collere Possetti

Revisores:

Bárbara Zanicotti Leite Ross, Charles Carneiro, Gustavo Rafael Collere Possetti, Marcelo Dalcul Depexe.

Dados internacionais de catalogação na publicação

E27 Eficiência energética no saneamento: trabalhos contemplados no Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis e no Prêmio Inova Sanepar – edição 2016 / Organizadores Bárbara Zanicotti Leite Ross, Charles Carneiro, Gustavo Rafael Collere Possetti. Curitiba : Sanepar, 2017.

130 p.

ISBN 978-85-69946-02-1

1. Saneamento 2. Sustentabilidade 3. Tecnologia ambiental
4. Energia Elétrica I. Ross, Bárbara Zanicotti Leite II. Carneiro, Charles III. Possetti, Gustavo Rafael Collere IV. Título.

CDD-333.7932

Elaborado por Iracélia dos Santos – CRB 9/1137

ISBN: 978-85-69946-02-1

Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar

Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento – APD

Rua Engenheiro Antônio Batista Ribas, 151, Tarumã, Curitiba – PR

CEP 82.800-130

Fone: 41 3777 – 7259

email: apd@sanepar.com.br

DIRETORIA DA SANEPAR

MOUNIR CHAOWICHE – Diretor Presidente

GLAUCO MACHADO REQUIÃO – Diretor de Meio Ambiente e Ação Social

LUCIANO VALÉRIO BELLO MACHADO – Diretor Administrativo

ANTONIO CARLOS SALLES BELINATI – Diretor Comercial

GUSTAVO FERNANDES GUIMARÃES – Diretor Financeiro

JOÃO MARTINHO CLETO REIS JUNIOR – Diretor de Investimentos

JÚLIO JACOB JÚNIOR – Diretor Jurídico

NEY AMILTON CALDAS FERREIRA – Diretor de Relações com Investidores

PAULO ALBERTO DEDAVID – Diretor de Operações

PRÊMIO SANEPAR DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS E PRÊMIO INOVA SANEPAR

DIRETORES RESPONSÁVEIS PELOS PRÊMIOS

MOUNIR CHAOWICHE – Diretor Presidente

GLAUCO MACHADO REQUIÃO – Diretor de Meio Ambiente e Ação Social

LUCIANO VALÉRIO BELLO MACHADO – Diretor Administrativo

COMISSÃO ORGANIZADORA

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE ROSS – Sanepar

CHARLES CARNEIRO – Sanepar

FERNANDA ARMELINDA CARDOSO – Sanepar

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI – Sanepar

RITA DE CÁSSIA DE OLIVEIRA LOUREIRO – Sanepar

THAYS RENATA POLETTI – Sanepar

COMISSÃO DE ANÁLISE DOCUMENTAL

ERICA ROSANA JACOMEL WEIBER – Sanepar

MARILENE MARIA LORA – Sanepar

SALETE ROECKER – Sanepar

COMISSÃO JULGADORA DO PRÊMIO SANEPAR DE TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE ROSS – Sanepar
DANIEL COSTA DOS SANTOS – UFPR
GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI – Sanepar
LEANDRO ALBERTO NOVAK – Sanepar
SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA – UFPR

COMISSÃO JULGADORA DO PRÊMIO INOVA SANEPAR

DANIEL COSTA DOS SANTOS – UFPR
FREDERICO FERREIRA DE VASCONCELOS – GIZ
GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI – Sanepar
MARCELO DALCUL DEPEXE – Sanepar
SÉRGIO MICHELOTTO BRAGA – UFPR

PLANEJAMENTO DE COMUNICAÇÃO

ROBERTA STORELLI – Sanepar
THAYS RENATA POLETTTO – Sanepar

DESENVOLVIMENTO DE ARTE GRÁFICA E WEBSITE

ALESSANDRO BUENO DE SOUZA – Sanepar
ALEXANDRE VICTORINO NUNES – Sanepar
ANDRÉIA CRISTINA PILARSKI DE LARA – Sanepar
CARLOS HENRIQUE JORGE – Sanepar
CLAUDIO DIONISI – Sanepar
ERICO ROLINSKI – Sanepar
KARINA AKIMURA – Sanepar
NEY MOREIRA DA CUNHA – Sanepar
RICARDO AMARAL – Sanepar
THAYS RENATA POLETTTO – Sanepar

APOIO ADMINISTRATIVO

BRUNA RANGEL – Sanepar
ELISANDRA DAL-COMUNI – Sanepar
FERNANDA ARMELINDA CARDOSO – Sanepar

ORGANIZADORES DO LIVRO

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE ROSS – Sanepar

CHARLES CARNEIRO – Sanepar

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI – Sanepar

REVISORES DE CONTEÚDO

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE ROSS – Sanepar

CHARLES CARNEIRO – Sanepar

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI – Sanepar

MARCELO DALCUL DEPEXE – Sanepar

REVISORES DE TEXTO

BENEDITO COSTA NETO

THAYS RENATA POLETTO

PROJETO GRÁFICO E IMPRESSÃO

Plotterprint Gráfica Digital e Design Ltda.

Rua Visconde do Rio Branco, 1358, loja 04

Ed. Hannover Empresarial - Curitiba-PR - CEP 80420-210

PREFÁCIO

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), com sede em Curitiba, foi criada em 23 de janeiro de 1963. A empresa presta serviços de abastecimento da população com água tratada, serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário, e, ainda, de coleta seletiva e destinação de resíduos sólidos.

Atualmente, a SANEPAR atende com o fornecimento de água tratada 345 municípios do estado do Paraná e 1 município do estado de Santa Catarina, beneficiando cerca de 10,8 milhões de pessoas. Além disso, a Companhia oferece serviços de esgoto a 174 municípios, favorecendo aproximadamente 7,1 milhões de habitantes. A Sanepar administra 168 estações de tratamento de água (ETAs), 1.019 poços de água, 234 estações de tratamento de esgoto (ETEs), 3 áreas de disposição de resíduos sólidos e mais de 7 mil empregados.

Premiada diversas vezes por seu desempenho, a empresa é referência no setor de saneamento no país em razão da sua eficiência operacional, dos seus resultados econômicos e da sua sólida política socioambiental.

Uma das razões de seu bom desempenho é o trabalho de pesquisa e inovação tecnológica, sob responsabilidade da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento (APD), ligada à Diretoria de Meio Ambiente e Ação Social (DMA). Com base de trabalho no Centro de Tecnologias Sustentáveis SANEPAR (CETS), no bairro Tarumã, em Curitiba, capital do estado do Paraná, a equipe da APD executa seus projetos com o intuito de aprimorar os processos da Companhia, tornando-os mais sustentáveis e eficientes. Para conduzir os projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação a Sanepar conta com uma rede de parceiros nacionais e internacionais composta por empresas, por agências de cooperação e por instituições de ensino e de pesquisa. Dentre os parceiros internacionais podem ser citados: a Universidade Nacional Autônoma do México (UNAM), e o Instituto de Educação para as Águas (UNESCO-IHE), da Holanda, a Agência de Cooperação Internacional do Japão

(JICA), bem como a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e a Universidade de Stuttgart, da Alemanha.

O tema da eficiência energética está entre os estudos técnicos e científicos desenvolvidos pela Sanepar de maior importância. Nesse sentido, a Companhia tem tratado de assuntos como a recuperação energética de biogás, lodo e espuma, provenientes do tratamento de esgoto, a realização de diagnósticos hidroenergéticos e o emprego da automação em infraestruturas sanitárias, a instalação de equipamentos eletromecânicos eficientes, a geração hidroenergética em sistemas de abastecimento de água, o uso de ferramentas para gestão eficiente de energia, a redução de perdas de água e o aproveitamento das energias solar e eólica. .

Preocupada com a contínua melhoria de suas atividades e buscando fomentar as pesquisas em relação à eficiência energética no país e entre seus empregados, a Sanepar dedicou ao tema, em 2016, a primeira edição de seu prêmio de investigação científica, o Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis (PSTS), aberto a todos os pesquisadores do país, e seu primeiro prêmio interno de boas práticas, o Prêmio Inova Sanepar, dedicado apenas para seus empregados. O objetivo desta obra é divulgar e compartilhar as excelentes ideias e experiências apresentadas pelos vencedores.

A SANEPAR acredita que esse é o melhor caminho para que cientistas e empregados sejam estimulados a refletir sobre soluções adequadas ao saneamento e ajudem a construir caminhos para a sustentabilidade.

APRESENTAÇÃO

Nos últimos anos, o tema energia tem sido amplamente discutido pela sociedade brasileira, sobretudo por conta das incertezas de sua disponibilidade e dos significativos aumentos tarifários. Isso ocorre porque a energia é um insumo imprescindível para os processos industriais e porque sua disponibilidade, custo e qualidade influenciam diretamente a capacidade competitiva das empresas. Não obstante, em tempos em que o aquecimento global e as mudanças climáticas são assuntos de repercussão mundial, a implementação de ações de eficiência energética torna-se fundamental para minimizar impactos ambientais e para reduzir emissões de gases indutores do efeito estufa. Nesse sentido, por meio da conservação e do uso racional da energia, bem como a partir do aproveitamento dos potenciais de geração de energia limpa, têm-se almejado a sustentabilidade não apenas econômica, mas também a social e a ambiental.

De modo geral, os prestadores de serviços de saneamento possuem instalações que demandam grande quantidade de energia elétrica, sendo que os gastos necessários para obtenção dessa energia comprometem significativamente seus respectivos faturamentos. Os gastos com energia elétrica desses prestadores de serviços no Brasil tipicamente variam entre 9 e 24% de suas despesas totais. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em 2014 as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviços de água e esgoto atingiram 3,5 bilhões de reais, referentes ao consumo de aproximadamente 12,7 TWh. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, esse valor representa aproximadamente 3% do consumo total de energia do país.

Particularmente, em 2015, a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) consumiu 676,7 GWh de energia elétrica, sendo que as atividades vinculadas aos processos água e esgoto demandaram juntas cerca de 99% dessa energia (em

torno de 90% referente ao processo água e aproximadamente 9% associada com o processo esgoto). Essa quantidade de energia foi majoritariamente consumida por motores e bombas e, portanto, está diretamente relacionada com a quantidade de água captada, tratada e distribuída para a população, bem como com a quantidade de esgoto coletado e tratado. As atividades administrativas, por sua vez, demandaram aproximadamente 1% do consumo total de energia da Companhia.

As despesas com energia elétrica representam o segundo maior custo da Sanepar e esse custo tem-se tornado cada vez mais representativo devido aos sucessivos reajustes tarifários provenientes da instabilidade do cenário energético verificado em nível nacional. Em 2014, por exemplo, a Sanepar gastou 206,1 milhões de reais com o consumo de energia elétrica de 682,9 GWh. Em 2015, a Companhia pagou 390,8 milhões de reais para um consumo de energia elétrica aproximadamente 1% menor do que aquele verificado no ano anterior. Ou seja, em um ano, constatou-se um acréscimo da ordem de 90% nos custos com energia elétrica da Companhia, os quais totalizaram 14,71% de suas despesas operacionais.

Cabe destacar, ainda, que o consumo de energia elétrica da Sanepar deve aumentar nos próximos anos por conta da política de universalização dos serviços de saneamento no Estado do Paraná e que os reajustes anuais da tarifa de energia elétrica devem ser superiores à inflação.

Nesse contexto, torna-se imprescindível fomentar ações de redução de despesas e de consumo de energia nas instalações da empresa, bem como identificar e aproveitar os potenciais viáveis de geração de energia alternativa inerentes às suas infraestruturas sanitárias. Para tanto, faz-se necessário incentivar a inovação, a pesquisa aplicada e o desenvolvimento de boas práticas que possibilitem a eficiência energética de processos da Companhia, bem como o aprimoramento do setor de saneamento brasileiro.

Por isso, concebeu-se o Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis e o Prêmio Inova Sanepar: concursos de natureza cultural para premiação de trabalhos acadêmicos, bem como de trabalhos técnicos e de boas práticas, que abordam o tema “eficiência energética”, que contribuam para o desenvolvimento do setor de saneamento e que sejam potencialmente aplicáveis na Sanepar.

Esses concursos são instrumentos para obtenção de ideias sustentáveis, concebidas a partir de conceitos técnicos e científicos como propósito de reconhecer e premiar trabalhos externos, desenvolvidos em instituições de ensino brasileiras, públicas ou privadas (Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis), além de trabalhos internos produzidos exclusivamente por empregados da Sanepar (Prêmio Inova Sanepar).

A edição de 2016 do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis contou com a submissão de 31 trabalhos provenientes de 14 instituições de ensino localizadas em oito diferentes unidades federativas do Brasil. Na categoria “Graduação e Especialização”, foram inscritos 11 trabalhos. Na categoria “Mestrado e Doutorado”, foram recebidos 20 trabalhos.

Por sua vez, a edição 2016 do Prêmio Inova Sanepar contou com a inscrição de 49 trabalhos desenvolvidos por empregados da Companhia, lotados em 27 diferentes unidades, localizadas em 16 municípios distintos do Estado do Paraná.

Todos os trabalhos inscritos nos Prêmios foram, inicialmente, submetidos a uma avaliação documental. Os trabalhos classificados nessa etapa foram, na sequência, avaliados por uma Comissão Julgadora composta por especialistas, de acordo com os seguintes critérios:

- Relevância da ideia para o setor do saneamento;
- Mérito científico, originalidade e inovação;
- Viabilidade técnica;
- Potencial de replicação;
- Sustentabilidade: impactos sociais, ambientais e financeiros, e;
- Potencial de redução de consumo e/ou de geração de energia e de mitigação da emissão de gases indutores do efeito estufa.

Todos os trabalhos foram pontuados e, posteriormente, ordenados de forma decrescente, resultando na relação classificatória dos Prêmios. Os trabalhos classificados até o terceiro lugar foram premiados em cada concurso e dentro das categorias de inscrição disponíveis.

Na categoria “Graduação e Especialização” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis, foram contemplados (por ordem de classificação) os trabalhos de Maiquel Auri Lamb (Universidade Federal de Santa Maria – Rio Grande do Sul), Bruna Scandolaro Magnus (Universidade Federal de Santa Catarina – Santa Catarina) e Kelly Borne (Universidade Federal da Integração Latino-Americana – Paraná).

Na categoria “Mestrado e Doutorado” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis, foram premiados (por ordem de classificação): André Pereira Rosa (Universidade Federal de Minas Gerais – Minas Gerais), Bruno Miyawaki (Universidade Federal do Paraná – Paraná) e Gustavo Meirelles Lima (Universidade Estadual de Campinas – São Paulo).

Por sua vez, os ganhadores do Prêmio Inova Sanepar foram (por ordem de classificação): Rodrigo Votre (Unidade de Serviço Eletromecânica de Curitiba), Katia Regina Garcia da Silva (Unidade de Serviço de Produção e Distribuição de Curitiba) e Vanderlei Gonçalves da Silva (Unidade Regional de Foz do Iguaçu).

Este livro compila os nove trabalhos premiados, sendo dedicado um capítulo a cada vencedor.

No primeiro capítulo, é apresentada uma avaliação do aproveitamento energético dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) como fonte para produção de energia renovável em estações de tratamento de esgoto (ETEs). O trabalho foi conduzido em Itabira-MG e ocorreu por meio da caracterização do potencial energético do lodo e do biogás, da determinação de balanços de massa e energia e do cálculo das reduções nas emissões de gases de efeito estufa potencialmente obtidas a partir da conversão dos subprodutos acima citados. Um modelo foi proposto para estimar de forma realista o potencial de produção de energia limpa a partir do lodo e do biogás em ETEs.

Uma das possibilidades para aprimorar o aproveitamento do biogás consiste em eliminar da sua composição o dióxido de carbono, considerado uma impureza porque reduz seu poder calorífico. O dióxido de carbono pode ser biologicamente convertido em matéria orgânica por microrganismos fotossintetizantes, como as microalgas. Nesse sentido, o segundo capítulo deste livro apresenta um estudo sobre a avaliação da capacidade de purificação do biogás por meio do cultivo da microalga *Scenedesmus disciformis* em fotobiorreator *air lift*. Os melhores resultados obtidos foram com o meio de cultivo contendo efluente de suíno com injeção de biogás. O biogás purificado apresentou uma concentração média de 91% de metano, resultando em um composto com elevado poder calorífico e, pronto disponível, para a produção de energia renovável.

O terceiro capítulo, por sua vez, trata da possibilidade de geração de energia limpa a partir de conversões hidroenergéticas em redes de distribuição de água. Nesse contexto, um método para a seleção de bombas funcionando como turbina em substituição a válvulas redutoras de pressão é apresentada. Respeitando as normas técnicas que definem os limites operacionais para parâmetros hidráulicos, tais como velocidade e pressão, o método baseia-se na maximização da energia produzida, restrita aos limites de pressão em cada nó da rede de distribuição de água, utilizando a técnica de otimização PSO (*Particle Swarm Optimization*) e as curvas características completas de bombas no plano Suter.

O quarto capítulo do livro detalha um estudo sobre a redução do consumo de energia elétrica em uma prestadora de serviços de saneamento localizada no Estado do Rio Grande do Sul, por meio da automação e da otimização operacional de um

sistema de bombeamento de água tratada. O trabalho avaliou custos e indicadores financeiros obtidos a partir da execução do projeto de eficiência energética.

No quinto capítulo, apresenta-se um estudo sobre o potencial de produção de biometano a partir de lemnas (*Landoltia punctata*). As lemnas são macrófitas aquáticas que apresentam pré-disposição para a remoção de nutrientes presentes no esgoto sanitário e alta taxa de crescimento, gerando, conseqüentemente, biomassa excedente passível de valorização energética. Observou-se que a maior produção específica de biogás e metano ocorreu a partir do substrato que passou por processo de pré-tratamento fermentativo. Os processos nos quais não ocorreu o pré-tratamento ou aqueles submetidos aos pré-tratamentos térmico ou alcalino apresentaram menores taxas de produção de biogás e metano.

O sexto capítulo também trata da possibilidade de produção de energia renovável a partir da recuperação do biogás. Particularmente, reporta-se uma proposta de tratamento de resíduo sólido urbano em conjunto com efluente doméstico em um biodigestor dimensionado para um condomínio residencial, seguido do uso energético do biogás.

O sétimo capítulo discorre sobre o uso da automação para a redução de perdas de água, minimização de impactos ambientais e promoção da eficiência energética em sistemas de abastecimento de água. Realizou-se um estudo de caso que avaliou as condições de operação de um sistema antes e depois da revitalização de sua automação, visando validar seu controle via set point de pressão e possibilitando o controle da variação de velocidade de conjuntos moto-bomba.

Um estudo sobre a otimização operacional do transporte e da reservação de água tratada em uma região do município de Curitiba-PR é apresentado no oitavo capítulo do livro. Essa é uma importante alternativa para redução de custos com energia elétrica associados com o fornecimento de água, pois busca o melhor aproveitamento da infraestrutura existente, tendo como premissa a ausência de investimentos financeiros.

O nono capítulo, enfim, reporta um estudo de caso sobre medidas implementadas no sistema de abastecimento de água do município de Foz do Iguaçu-PR. Uma Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE) foi estruturada e, mediante apoio da equipe do centro de controle operacional e da equipe de engenharia da unidade regional, executaram-se paradas nas estações elevatórias de água bruta e tratada nos horários de ponta, resultando em redução de custos com energia elétrica. Os resultados obtidos evidenciam que as medidas adotadas promoveram retornos financeiros, bem como o entendimento de que é possível projetar e operar os sistemas de abastecimento de água de forma mais eficiente do ponto de vista energético.

O livro ainda apresenta como apêndice informações curriculares sobre os autores dos trabalhos premiados e sobre a Comissão de Julgadora dos Prêmios.

SUMÁRIO

PREFÁCIO	7
APRESENTAÇÃO	9
SUMÁRIO	15
1. APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	17
2. PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DE CULTIVO DE MICROALGAS EM EFLUENTES ORGÂNICOS	33
3. MÉTODO PARA SELEÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT) EM SUSBTITUIÇÃO ÀS VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO	45
4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM BOMBEAMENTOS DE ÁGUA TRATADA	57
5. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE LEMNAS: EFEITO DO PRÉ- TRATAMENTO	71

6. DIMENSIONAMENTO DE UM BIODIGESTOR: APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS URBANOS PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS	81
7. AUTOMAÇÃO NO CONTROLE DE PERDAS, IMPACTOS AMBIENTAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	91
8. OTIMIZAÇÃO DA MACRODISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO INTEGRADO DE CURITIBA – SAIC	103
9. USO RACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA COM A IMPLANTAÇÃO DA COMISSÃO INTERNA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CICE	113
INFORMAÇÕES SOBRE OS AUTORES PREMIADOS	123
INFORMAÇÕES SOBRE OS MEMBROS DA COMISSÃO DE AVALIAÇÃO	127

CAPÍTULO 1

Primeiro colocado na Categoria "Mestrado e Doutorado" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

APROVEITAMENTO DE BIOGÁS E LODO EXCEDENTE DE REATORES UASB COMO FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

André Pereira Rosa^{1*}

*Lívia Cristina da Silva Lobato*²

*Carlos Augusto de Lemos Chernicharo*³

¹ *Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG*

² *Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – UFMG*

³ *Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG*

* andrerosa@ufv.br

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo avaliar o aproveitamento dos subprodutos biogás e lodo excedente de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. Os trabalhos foram conduzidos na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) *Laboreaux*, em Itabira – MG, através da caracterização do potencial energético do lodo e do biogás e com a proposta de determinação de balanços de massa e energia, além do cálculo das redu-

ções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) por metodologia proposta pelo UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) para dois cenários que apresentam, em linhas gerais: 1– uso prioritário do biogás para a secagem do lodo, e 2 – uso prioritário do biogás para a geração de eletricidade. Por fim, propôs-se o uso de modelagem matemática para a estimativa do balanço energético em ETEs com o uso dos subprodutos como fonte de energia. No que se refere ao desenvolvimento do modelo matemático, os resultados indicam que o modelo permitiu uma estimativa realista da produção de lodo e do potencial energético total nas ETEs.

Palavras-Chave: biogás, recuperação de energia, lodo, tratamento de esgoto, reatores UASB.

INTRODUÇÃO

Contextualização e justificativa

Atualmente, os reatores UASB, empregados no tratamento de esgoto doméstico, já apresentam grande aplicação e certo estágio de maturidade tecnológica, em especial em países tropicais, com destaque para o Brasil. No entanto, apesar de suas vantagens, os reatores UASB apresentam ainda limitações não completamente solucionadas. Caso diretrizes adequadas para projeto, construção e operação não sejam disponibilizadas em curto espaço de tempo, a tecnologia pode ser desacreditada e sua aplicação reduzida (CHERNICHARO & STUETZ, 2008). De forma paralela, o emprego dos reatores UASB apresenta potenciais ainda não explorados em plenitude até o presente, como é o caso do aproveitamento energético conjunto do lodo e do biogás.

Diante deste contexto, observa-se uma nova área de pesquisa ainda a ser explorada com a recuperação energética do lodo, a qual pode ser atrelada com os estudos de aproveitamento do biogás para este mesmo fim, revelando inúmeras possibilidades de uso individual ou combinado, tendo como intuito a geração de energia ou calor em benefício da própria ETE, ou o repasse a terceiros. O desenvolvimento da recuperação energética dos principais subprodutos gerados em reatores UASB tem o potencial de conferir às estações maior independência energética e vantagens no âmbito ambiental, social e econômico.

A necessidade de avanços na recuperação energética do lodo e do biogás, atrelada ao seu representativo potencial energético e à constante produção nas ETEs, justifica os estudos que propõem o uso destes materiais como fonte de energia renovável. No Brasil, o lodo é geralmente encaminhado para aterro sanitário e o biogás queimado

em flare, gerando-se emissões de gases de efeito estufa. O biogás, em especial, ao ser empregado como fonte para a geração de eletricidade, contribuiria como fonte renovável na matriz energética.

Objetivos do trabalho

Este trabalho teve como objetivo propor o aproveitamento energético dos subprodutos (lodo e biogás) gerados em reatores UASB, a fim de demonstrar que estes podem constituir fonte de energia renovável para as ETEs. Dentro deste escopo, definem-se os seguintes objetivos específicos, a saber:

- Atestar as propriedades energéticas do lodo e do biogás como fonte de energia renovável em ETEs;
- Avaliar o potencial energético e de redução nas emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*, e;
- Propor o emprego de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB.

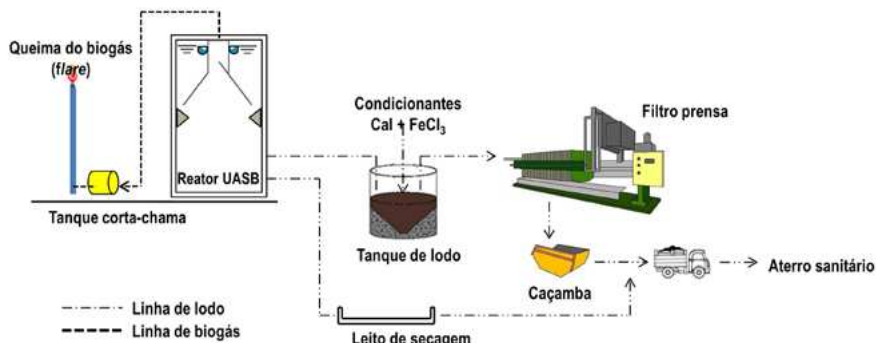
METODOLOGIA

Este trabalho foi organizado da seguinte forma: (i) estimativa do potencial energético do biogás e do lodo, determinação de cenários para seus usos, e o estudo da redução das emissões de GEE. Para tanto, a ETE *Laboreaux* (Itabira/ MG) foi utilizada como estudo de caso. Foi realizada a caracterização dos subprodutos para fins energéticos, assim como o emprego de metodologias do UNFCCC para a estimativa da redução das emissões de GEE, e balanços de massa e energia foram realizados para aprimorar as comparações dos cenários. (ii) Desenvolvimento de um modelo matemático com o uso da simulação de Monte Carlo, para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB recebendo a contribuição de uma população de até um milhão de habitantes.

Estimativa do potencial energético e da redução das emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*.

A ETE *Laboreaux* apresenta fluxograma simplificado, compreendendo unidades de tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), unidades de tratamento biológico anaeróbio e aeróbio em sequência (reator UASB, filtro biológico percolador – FBP e decantador secundário). A Figura 1 apresenta as etapas relacionadas com o gerenciamento do lodo e do biogás. O monitoramento da ETE (caracterização e quantificação dos subprodutos, assim como o cálculo da demanda energética da estação) ocorreu no período de outubro de 2010 a outubro de 2011.

Figura 1 – Fluxograma esquemático das etapas relacionadas com o sistema de gerenciamento do lodo e do biogás na ETE *Laboreaux*.



▪ Caracterização do lodo

O lodo foi quantificado pela pesagem do caminhão transportador após o carregamento de cada caçamba de estocagem do lodo desidratado, antes do envio para o aterro sanitário da cidade de Itabira. As análises realizadas foram: umidade, poder calorífico superior, composições elementar e imediata. Todas as análises foram realizadas em triplicata de acordo com procedimentos estabelecidos no *Standard Methods* (APHA/WEF, 2005) e NBR 8112 (ABNT, 1986). O poder calorífico superior real (PCS) do lodo, base seca (b.s.) foi determinado em laboratório com o uso de uma bomba calorimétrica adiabática. Os poderes caloríficos superior (PCS_s), base seca, e inferior (PCI_t), base de trabalho, teóricos, foram determinados de acordo com as equações propostas pela fórmula de Dulong e por Cortez *et al.* (2008).

▪ *Caracterização do biogás*

Nesse mesmo período, amostras de biogás foram coletadas em duplicata por meio de seringas plásticas equipadas com válvulas de três vias, em um ponto anterior ao queimador de gases.

▪ *Cálculo do balanço energético da ETE Laboreaux*

A demanda energética considera o consumo de eletricidade na estação para a manutenção das atividades de operação do sistema de tratamento. Para o período considerado, a demanda energética da ETE *Laboreaux* correspondeu a 1.586 kWh.d⁻¹ (5.709 MJ.d⁻¹). No que se refere à determinação do potencial energético¹ total dos subprodutos, o lodo desidratado em filtro prensa foi considerado inadequado para fins energéticos, devido ao excessivo conteúdo de umidade. A fim de viabilizar seu uso potencial como combustível, propõe-se sua secagem até a umidade de 10%.

▪ *Proposta integrada de aproveitamento energético de lodo e biogás*

Dois cenários de aproveitamento energético dos subprodutos foram considerados no presente estudo, conforme detalhamento na Figura 2. O software CHEMCAD[®] foi utilizado como ferramenta para a simulação dos processos de combustão² (queima direta do biogás na câmara de combustão e no MCI), o qual foi subsídio para o cálculo dos balanços de massa e energia para ambos os cenários. Os mesmos cenários foram estudados na sequência da estimativa da redução de emissões de GEE, conforme descrito no item seguinte.

▪ *Quantificação da redução nas emissões de GEE pelo uso do biogás e lodo como biocombustível*

Esta etapa teve como objetivo apresentar e comparar a redução dos GEE para os dois cenários propostos de aproveitamento energético dos subprodutos lodo e biogás para a ETE *Laboreaux*³. As metodologias aplicadas para os cenários propostos foram (UNFCCC, 2011): AMS III-E – Geração de metano evitado pelo decaimento da biomassa através de processos de combustão, gaseificação e tratamento mecânico/térmico, versão 16.0, escopo setorial 13; AMS I-D – Geração de eletricidade renovável conectada à rede, versão 17, escopo setorial 01. A Figura 2 delimita a aplicação das metodologias dentro do fluxograma da ETE *Laboreaux*.

¹ A descrição do procedimento para o cálculo do potencial energético dos subprodutos é descrito em Rosa (2013).

² Um detalhamento maior sobre as características dos processos de queima é apresentado por Rosa (2013).

³ Atualmente, apenas projetos já registrados na UNFCCC estão em condições de gerar créditos de carbono que podem ser adquiridos na União Europeia, e em função disso os preços estão em níveis muito menores. No entanto, o Brasil assumiu compromissos de redução de suas emissões no Protocolo de Paris, assinado em 2015, e a Lei da Política Nacional de Mudanças do Clima prevê a criação do mercado de emissões reduzidas a nível nacional. As metodologias da UNFCCC têm servido de base para a quantificação de emissões reduzidas nos mercados nacionais.

Figura 2– Cenários para a recuperação energética dos subprodutos da ETE *Laboreaux*:
(a) cenário 1 e (b) cenário 2.

Figura 2-a

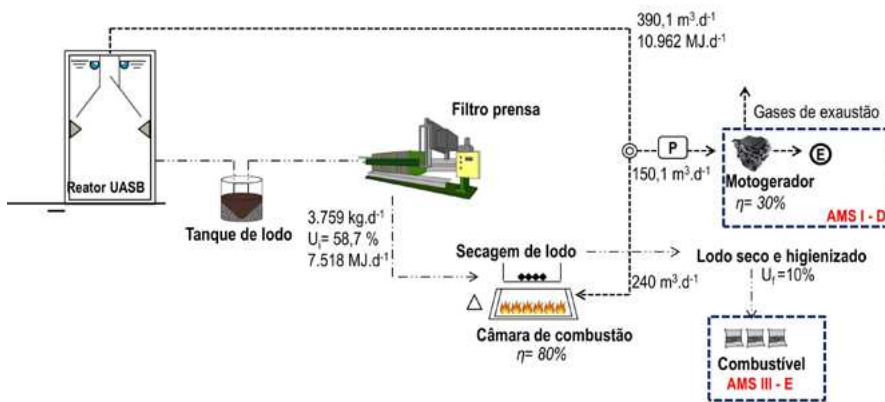
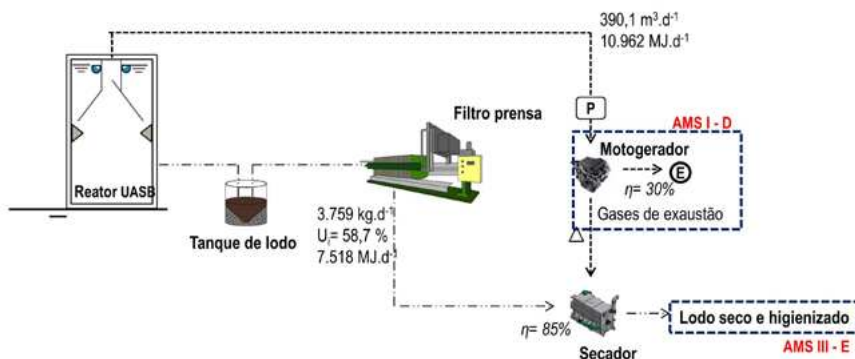


Figura 2-b



— · — · — ·	Linha de lodo	P	Purificação de biogás	E	Eletricidade	η	Eficiência de conversão
— — — —	Linha de biogás	Δ	Energia térmica	\odot	Detalhamento de alternativas	u	Umidade

Cenário 1: uso prioritário do biogás em câmara de combustão visando a geração de calor para a secagem térmica do lodo desidratado e o excedente de biogás para geração de eletricidade em motor de combustão interna (MCI).

Cenário 2: uso prioritário do biogás em MCI visando a geração de eletricidade e aproveitamento do calor dos gases de exaustão do motor para a secagem térmica de lodo.

Desenvolvimento de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB

O modelo matemático⁴, simulação de Monte Carlo, foi estruturado em uma planilha eletrônica. De maneira geral, o modelo matemático foi desenvolvido considerando três cenários que acarretam potenciais de recuperação dos subprodutos biogás e lodo excedente: (i) pior cenário; (ii) cenário típico e (iii) melhor cenário. O Quadro 1 descreve as principais características dos cenários.

Quadro 1 – Descrição das características do pior e melhor cenários para o modelo matemático (*) relativos ao lodo e biogás gerados em reatores UASB.

Cenário	Pior cenário	Melhor cenário
Aspectos relacionados ao biogás*	Sistemas operando com esgoto mais diluído. Maiores concentrações de sulfato. Menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano.	Sistemas operando com esgoto mais concentrados. Menores concentrações de sulfato. Maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano.
Aspectos relacionados ao lodo	Elevada presença de cinzas. Baixa concentração hidrogênio. Baixo teor de sólidos fixos.	Reduzida presença de cinzas. Elevada concentração de hidrogênio. Elevado teor de sólidos fixos.

^(*) Fonte: Lobato (2011).

Protocolo para o cálculo do balanço energético das ETEs

Para a estimativa do balanço energético de ETEs operando com reatores UASB, atendendo a uma contribuição de até um milhão de habitantes, foi realizada inicialmente a determinação do potencial energético dos subprodutos. Na sequência, foi estimado o consumo energético das ETEs em função do gasto energético para a operação de estações elevatórias de esgoto (EEE) com diferentes alturas manométricas e, por fim, feita a estimativa da produção líquida de eletricidade pelo uso do biogás como fonte de energia.

⁴ Rosa (2013) apresenta as características adotadas para lodo e biogás utilizados no modelo. A variabilidade nos dados foi incorporada à interpretação dos resultados do modelo, através da Análise da Incerteza, com a execução de um elevado número de simulações (250 simulações por cenário). Em cada corrida do modelo, é selecionado um conjunto diferente de valores gerados aleatoriamente e dentro de faixas pré-estabelecidas.

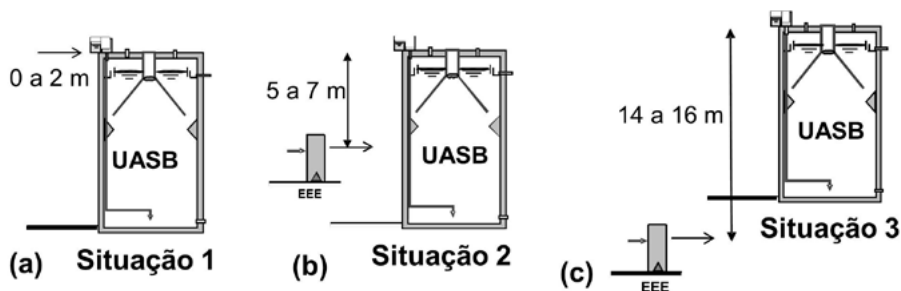
Estudo do potencial energético dos subprodutos biogás e lodo

O potencial de recuperação energético do biogás seguiu metodologia descrita por Lobato (2011). A estimativa da produção de lodo para centrífuga, filtro-prensa e leito de secagem foi determinada de acordo com Chernicharo (2009). O estudo do potencial energético do lodo foi realizado como detalhado por Rosa (2013).

Estimativa do consumo energético e produção líquida de eletricidade para as ETEs

Considerou-se que a principal parcela envolvida com a energia elétrica demandada (consumida) pelas ETEs se refere ao gasto energético para o bombeamento do esgoto nas EEE. A estimativa do consumo energético nas ETEs foi realizada considerando-se a seguinte classificação, conforme detalhado na Figura 3.

Figura 3 –Diferentes cenários estudados para a determinação do consumo energético em ETEs variando-se a altura de bombeamento de esgoto: (a) 0 a 2 m; (b) 5 a 7 m; (c) 14 a 16 m.



Aproveitamento energético do lodo e do biogás: um estudo de caso para as ETEs da Sanepar

Em adição, algumas considerações foram feitas sobre as 213 ETEs com reatores UASB operadas pela Sanepar (PR)⁵ com o intuito de demonstrar a aplicação e a capacidade de replicação da pesquisa. A partir da vazão de projeto de esgoto ($L \cdot s^{-1}$), determinou-se para o biogás sua produção esperada ($m^3 \cdot d^{-1}$) e seu potencial energético ($MJ \cdot d^{-1}$) e, para o lodo, a estimativa do potencial energético ($MJ \cdot d^{-1}$) disponível para as ETEs. No estudo referente ao lodo, considerou-se que a desidratação do lodo ocorre nas ETEs por leitos de secagem (vazão de projeto $< 45 L \cdot s^{-1}$) e com uso de centrífuga (vazão de projeto $\geq 45 L \cdot s^{-1}$).

⁵ Os dados de operação das ETEs já foram utilizados pelo professor orientador deste trabalho em estudos anteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estimativa do potencial energético e da redução das emissões de GEE pela proposta de uso do biogás e de lodo como fonte de energia: Estudo de caso da ETE *Laboreaux*

Potencial energético dos subprodutos

No período de monitoramento, a vazão de esgoto afluyente à estação apresentou um valor médio de $6.751 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ($78 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$) e a produção volumétrica de biogás gerado nos reatores UASB teve valor médio de $390,1 \text{ Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. A composição média de biogás nesse mesmo período foi de 78,2 % de CH_4 , 6,7 % de CO_2 e uma mistura de outros constituintes de 15,1 %. A partir das características do biogás, estima-se um potencial de energia da ordem de $10.962 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ ($28 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$ de metano e produção de $390,1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva para a caracterização do lodo gerado na unidade de desaguamento por filtro prensa na ETE *Laboreaux*. Identifica-se um potencial energético do lodo da ordem de $7.518 \text{ MJ} \cdot \text{d}^{-1}$ a partir do material com umidade de 58,7% (PCI_t real de $1,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ e geração de $3.759 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$).

Tabela 1 – Estatística descritiva dos resultados de caracterização do lodo desidratado gerado na ETE *Laboreaux*.

Estatística			Média	Nº dados	Mediana	σ
Composição imediata	% em massa (b.s)	Voláteis	42,9	31	43,7	4,0
		Cinzas	53,3	31	53,3	3,1
		Fixos	3,8	31	3,6	1,9
Umidade	%		58,7	29	58,2	5,9
Poder calorífico ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Teórico	PCS (b.s)	7,4	27	7,4	0,9
		PCI (b.t)	1,7	27	1,5	1,4
	Real	PCS (b.s)	8,7	26	8,6	1,2
		PCI (b.t)	2,0	24	1,9	0,8
Composição elementar, % em massa (b.s)		C	19,8	19	19,6	1,6
		H	3,6	19	3,5	0,3
		N	2,1	19	2,0	0,5
		O*	20,5	19	20,0	2,0
		Cinzas**	54	19	53,9	3,2

Nota: b.s: base seca, b.t: base de trabalho, PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), σ (desvio padrão em relação ao valor médio). *Determinado por diferença. **Considerados os dados medidos de cinzas para os dias que em houve caracterização de composição elementar.

Análise comparativa das alternativas de aproveitamento energético dos subprodutos e redução de GEE

As Figuras 4 e 5 apresentam os balanços de massa e energia para os cenários 1^o e 2, respectivamente.

Figura 4 – Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a secagem térmica do lodo desidratado na ETE *Laboreaux* – Cenário 1.

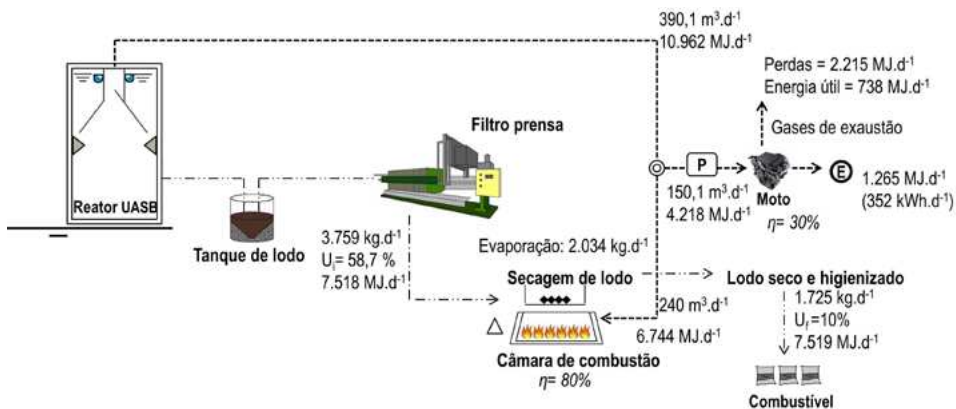
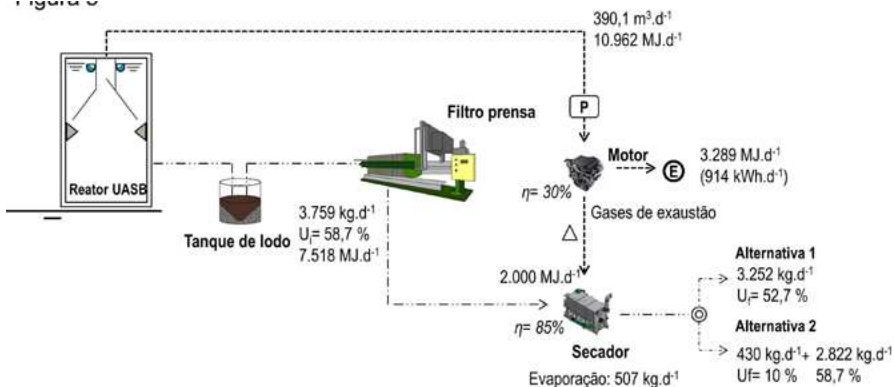


Figura 5 – Balanço de massa e energia para o aproveitamento energético do biogás para a geração de eletricidade seguida de secagem térmica do lodo com os gases de exaustão na ETE *Laoreaux* – Cenário 2.



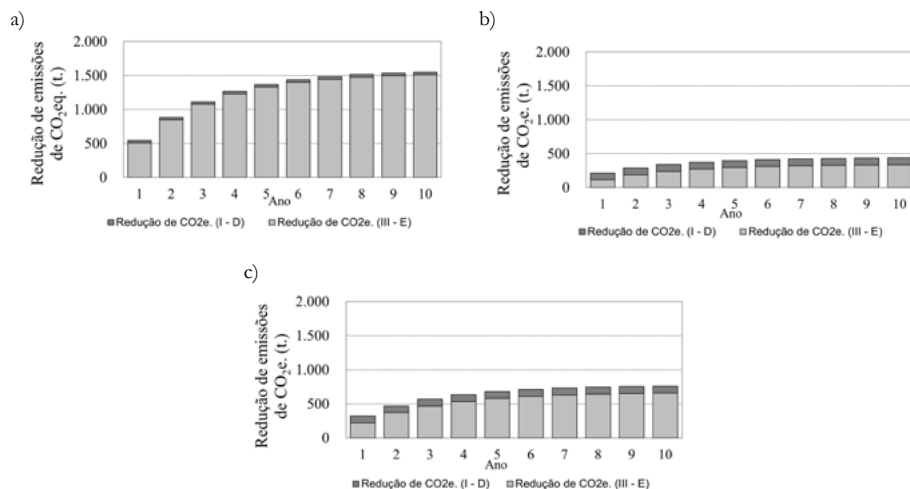
Alternativa 1: secagem térmica de todo lodo desidratado até uma umidade final mínima possível..

Alternativa 2: secagem térmica de fração do lodo até uma umidade final de 10% e o envio do restante do material desidratado (umidade de 58,7%) para aterro sanitário.

⁶ O detalhamento completo dos balanços de massa e energia para os cenários 1 e 2 são apresentados e discutidos por Rosa (2013).

A Figura 6a, 6b e 6c apresenta as reduções acumuladas das emissões de GEE (t.CO₂e.⁷) a partir da aplicação das metodologias III-E e I-D para os cenários 1, 2-a e 2-b, respectivamente.

Figura 6 - Redução das emissões de GEE (t.CO₂e): cenário 1 (a), cenário 2-a (b) e cenário 2-b (c).



A Tabela 2 apresenta um resumo dos benefícios econômicos que a empresa de saneamento teria obtido caso tivesse submetido o projeto de redução das emissões de gases de efeito estufa ao mercado de créditos de carbono, além de outras características dos cenários.

Tabela 2 –Resumo das características dos cenários e o ganho bruto caso o projeto tivesse sido submetido ao mercado de créditos de carbono para a ETE *Laboreaux*.

Cenário	1	2-a	2-b
Lodo não enviado para o aterro (t.ano ⁻¹)	1.372	1.187	1.030
Redução de lodo para o aterro (%)	100	86	75
Oferta de eletricidade ³	kWh.d ⁻¹	352	914
	%	22	57,6
Crédito de carbono (t. CO ₂ e.) ¹	12.691	3.741	6.392
Ganho bruto (US\$) ^{1,2}	133.111	39.239	67.044

Notas: 1para um período de 10 anos. 2cotação do dólar em 27/09/2013. 3produção de eletricidade para ambos os cenários e a porcentagem de fornecimento de eletricidade a partir de uma demanda da ETE *Laboreaux* de 1,586 kWh.d-1.

⁷ t.CO₂e. – toneladas de CO₂ equivalente é a unidade padrão e considera todas as emissões de gases de efeito estufa em uma mesma base (CO₂e)

Em adição, os resultados demonstram que o cenário 1 apresentou uma melhor performance na secagem e na conversão do lodo em subproduto energético e pode eliminar completamente a geração de rejeitos a serem dispostos no aterro sanitário. Em contrapartida, o potencial de geração de eletricidade é muito inferior, suficiente para atender apenas 22% da demanda da ETE.

Desenvolvimento de modelo matemático para a estimativa do balanço energético em ETEs operando com reatores UASB

A partir do modelo, foi previsto o potencial energético dos subprodutos para ETEs com população contribuinte de até um milhão de habitantes. A Figura 7 apresenta a produção estimada de biogás e o potencial energético do biogás em função de diferentes vazões contribuintes. A Tabela 3 apresenta um resumo dos dados relacionados com a regressão linear da Figura 7. A Tabela 4 apresenta informações sobre a regressão linear que relaciona o potencial de geração de energia pelo uso do lodo a partir da vazão efluente e da população contribuinte, para desidratação por filtro prensa, centrífuga e leitos de secagem.

Figura 7 – Estimativa da produção de biogás e do potencial energético do biogás em reatores UASB tratando esgoto tipicamente doméstico em função de vazão afluente de até 2.500L.s⁻¹

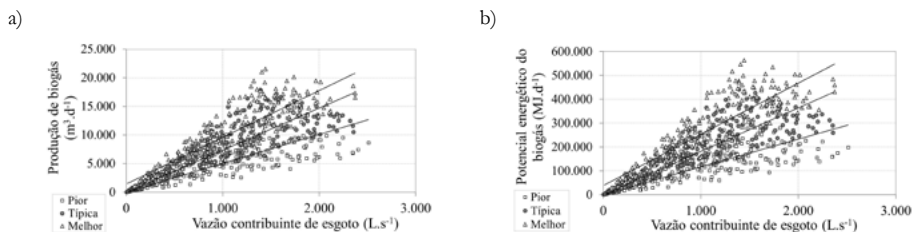


Tabela 3 – Resumo com as informações sobre a regressão linear para diversas relações propostas. Eixo x (parâmetros de projeto) e Eixo y (considerações acerca do biogás).

Relação (x,y)		L.s ⁻¹ x m ³ .d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab. x MJ.d ⁻¹
Cenário Pior	Equação	y = 5,05x	y = 116,37x	y = 0,259x
	R ²	0,52	0,52	0,84
Cenário Típico	Equação	y = 7,36x	y = 181,74x	y = 0,37x
	R ²	0,67	0,7	0,93
Cenário Melhor	Equação	y = 8,16x + 1.460	y = 214,68x + 38.417	y = 0,49x - 470,29
	R ²	0,78	0,78	0,96

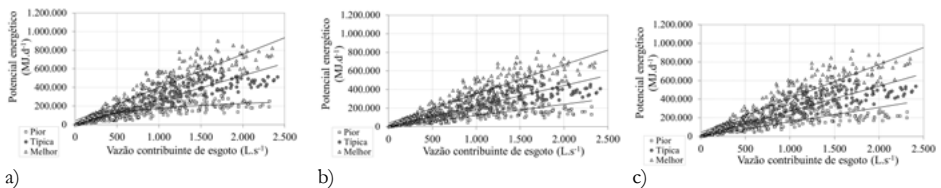
Tabela 4 – Resumo com as informações para a determinação do potencial energético do lodo (MJ.d⁻¹) – eixo y, a partir de dados de vazão e população contribuinte, para diferentes formas de desidratação.

Unidade		Filtro Prensa		Centrífuga		Leitos de secagem	
Relação (x,y)		L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹	L.s ⁻¹ x MJ.d ⁻¹	hab x MJ.d ⁻¹
Cenário Pior	Equação	y = 25,83x	y = 0,05x	y = 0	y = 0	y = 34,26x	y = 0,07x + 990
	R ²	0,72	0,83	-	-	0,72	0,82
Cenário Típico	Equação	y = 94x	y = 0,19x	y = 50,18x	y = 0,10x	y = 103,08x	y = 0,21x + 594,30
	R ²	0,87	0,98	0,76	0,88	0,85	0,96
Cenário Melhor	Equação	y = 140,0x + 18.962	y = 0,32x + 60,36	y = 100,4x + 2.736	y = 0,22x - 06,41	y = 146,88x + 0341	y = 0,33x + 61,17
	R ²	0,86	0,98	0,84	0,96	0,85	0,97

Potencial energético global dos subprodutos da ETE

A Figura 8 apresenta o potencial energético para ETEs com desidratação do lodo por filtro prensa, centrífuga e leito de secagem, respectivamente⁸. A Tabela 5 apresenta a regressão linear do potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) em função da vazão afluyente (L.s⁻¹), para as diferentes tecnologias de desidratação. A Tabela 6 apresenta os dados de regressão linear para a produção de energia disponível às ETEs em função da vazão afluyente para diferentes faixas de alturas manométricas.

Figura 8 - Potencial energético total (lodo e biogás) de ETEs com até 1.000.000 habitantes com o uso de (a) filtro prensa; (b) centrífuga; (c) leito de secagem.



⁸ A validação do modelo para a geração e o potencial energético do lodo foi realizada por Rosa (2013) a partir de dados reais das ETEs de Nova Contagem (MG) e Itabira (MG), nas quais a desidratação do lodo proveniente dos reatores UASB ocorre por centrífuga e filtro-prensa, respectivamente. Da mesma forma, o modelo foi validado por Lobato (2011) para a produção e o potencial de biogás para ETEs de diferentes portes.

Tabela 5 - Regressão linear para o potencial energético total da ETE (MJ.d⁻¹) - eixo y, em função da vazão contribuinte (L.s⁻¹) – eixo x, para as diferentes alternativas de desidratação.

Unidade		Filtro Prensa	Centrífuga	Leito de Secagem
Cenário Pior	Equação	$y = 120,69x$	$y = 73.771\ln(x) - 332.727$	$y = 154,62x$
	(R ²)	0,45	0,56	0,52
Cenário Típico	Equação	$y = 220,70x$	$y = 263,55x$	$y = 270,16x$
	(R ²)	0,72	0,76	0,76
Cenário Melhor	Equação	$y = 313,93x + 39.751$	$y = 356,95x + 42.367$	$y = 364,68x + 43.013$
	(R ²)	0,85	0,86	0,86

Tabela 6 - Resumo com as informações sobre a regressão linear para diferentes faixas de alturas entre a vazão de esgoto (L.s⁻¹) – eixo x, e a energia disponível para as ETEs (kWh.d⁻¹) - eixo y.

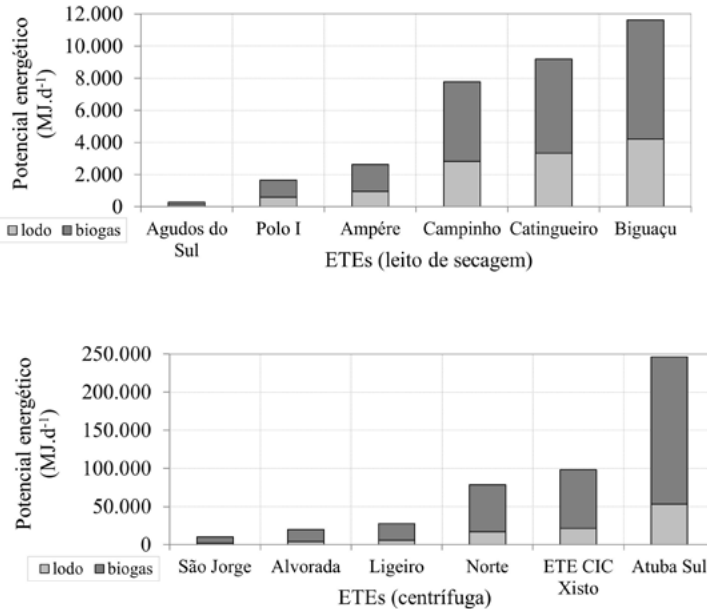
Faixas de alturas manométricas		0 a 2 m	5 a 7 m	14 a 16 m
Cenário Pior	Equação	$y = 9,65x$	$y = 7,68x$	$y = 4,22x$
	R ²	0,42	0,26	-0,02
Cenário Típico	Equação	$y = 13,86x$	$y = 11,92x$	$y = 8,37x$
	R ²	0,68	0,59	0,35
Cenário Melhor	Equação	$y = 19,36x$	$y = 17,37x$	$y = 13,77x$
	R ²	0,81	0,78	0,66

Estudo de caso das ETEs da Sanepar

Com o intuito de demonstrar a relevância do trabalho e seu potencial de replicação, a equação que representa, para um cenário típico, a relação entre a vazão contribuinte de esgoto (L.s⁻¹) – eixo x, versus produção esperada de biogás (m³.d⁻¹) – eixo y, para as 213 ETEs que operaram com reatores UASB na Sanepar é $y=7,3576x$. Para a relação entre a vazão contribuinte de esgoto (L.s⁻¹) versus o potencial de recuperação de biogás (MJ.d⁻¹), a relação correspondeu a $y=206,03x$. A predição foi realizada para as ETEs da Sanepar e as equações estão em convergência com o modelo estudado (conforme indicado na Tabela 3). Para fins ilustrativos, a Figura 9 apresenta a estimativa do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) para algumas das ETEs da Sanepar em função das alternativas de desidratação do lodo (leito de secagem e centrífuga) a partir das premissas especificadas na metodologia. Os dados foram gerados a partir das Tabelas 3 e 4, considerando-se o cenário típico. A relação adimensional entre o potencial energético do biogás/lodo foi de 1,76

e 3,62 para as ETEs da Sanepar que fazem uso de leitos de secagem e centrífuga, respectivamente.

Figura 9 – Estimativa do potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) em reatores UASB para ETEs da Sanepar operando por (a) leito de secagem e (b)



CONCLUSÕES

Verificou-se o potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás), os quais podem ser empregados como fonte de energia renovável em ETEs, agregando benefícios ambientais. O biogás apresentou maior potencial de geração de energia, enquanto que a simples secagem do lodo já confere vantagens no que se refere ao transporte e à destinação desse elemento, mesmo que não seja utilizado com fins energéticos.

A caracterização sistemática da produção e do poder calorífico do biogás e do lodo produzidos na ETE Laboreaux possibilitou o desenvolvimento de balanços de massa e de energia que demonstraram o potencial de aproveitamento desses subprodutos do tratamento como fonte de energia renovável. Em adição, o aproveitamento energético dos subprodutos pode contribuir significativamente com a redução de GEE e trazer, além dos benefícios ambientais, vantagens econômicas.

O modelo proposto é uma ferramenta viável para se determinar o potencial energético do lodo e do biogás, o que favorece a tomada de decisão e o estudo de potencialidade de emprego dos subprodutos em benefício das ETEs. Além disso, pode ser facilmente aplicado em outros estudos de caso, como demonstrado para a Sanepar.

REFERÊNCIAS

- CHERNICHARO, C.A.L.; STUETZ, R.M. Energy Recover from Biogas *in* Anaerobic Wastewater Treatment Plants.2008. *In*: CHERNICHARO, C.A.L. *Limitações e Possíveis Melhorias Futuras no Projeto, na Construção e na Operação de Reatores UASB Tratando Esgotos Domésticos*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2009. Relatório final de atividades do pós-doutorado.
- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. Biomassa para energia. Campinas: Editora Unicamp, 2008.
- LOBATO, L. C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011. 173 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- ROSA, A. P. Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em Estações de Tratamento de Esgoto tratando esgoto doméstico. 2013. 172 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change.2011. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies>. Acesso em 14 jan. 2013.

CAPÍTULO 2

Segundo colocado na Categoria "Mestrado e Doutorado" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

PURIFICAÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DE CULTIVO DE MICROALGAS EM EFLUENTES ORGÂNICOS

Bruno Miyawaki^{1*}
*Anderson Cardoso Sakuma*²
*André Bellin Mariano*³
*Beatriz Santos*⁴
*Diego de Oliveira Corrêa*⁵
*José Viriato Coelho Vargas*⁶
*Nelson Fernando Herculano Selesu*⁷
*Wellington Balmant*⁸

¹ Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais – UFPR

² Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais – UFPR

³ Professor Adjunto, Doutor em Ciências (Bioquímica) – UFPR

⁴ Doutoranda em Genética – UFPR

⁵ Doutorando em Bioquímica – UFPR

⁶ Professor Titular, Doutor em Mecânica – UFPR

⁷ Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais – UFPR

⁸ Doutor em Ciências (Bioquímica), Pesquisador – UFPR

* bruno.miyawaki@lactec.org.br

RESUMO

A necessidade de atender à demanda de energia do mundo e reduzir os impactos ambientais causados pelos resíduos provenientes das atividades humanas está entre os principais desafios da atualidade. Diante deste cenário, a captura e a posterior utilização do

biogás produzido na degradação da matéria orgânica como fonte de energia se apresenta como uma alternativa a ser avaliada. Todavia, a presença de impurezas no biogás como o dióxido de carbono (CO_2) e o ácido sulfídrico (H_2S) limita sua qualidade para utilização como fonte energética. Uma das possibilidades para melhorar o aproveitamento do biogás consiste em eliminar da sua composição o dióxido de carbono. O CO_2 pode ser biologicamente convertido em matéria orgânica por microrganismos fotossintetizantes, como as microalgas. Desta forma, este estudo teve como objetivo avaliar a capacidade de purificação do biogás produzido pela biodigestão de efluente suíno, através do cultivo da microalga *Scenedesmus disciformis* em fotobiorreator *airlift* (12 L), desenvolvido para essa finalidade. Para este estudo, como meio de cultura alternativo, foram utilizados os efluentes biodigeridos suíno, esgoto sanitário e bovino diluídos em 5%, 25% e 30% respectivamente. Testou-se a capacidade de crescimento das microalgas através da injeção controlada de biogás nos cultivos, assim como a purificação do biogás pela cultura de microalgas. Determinou-se a taxa de crescimento celular e biomassa seca dos cultivos de microalgas diariamente. Os melhores resultados obtidos foram com o meio suíno 5% com injeção de biogás, alcançando a concentração celular de $13.257 \times 10^4 (\pm 430) \text{ cel.mL}^{-1}$ e $2,0 (\pm 0,16) \text{ g.L}^{-1}$ de biomassa seca com teor de 26% de lipídeos. O biogás purificado apresentou uma concentração média de 91% de CH_4 . O poder calorífico do biogás aumentou de $5.592 \text{ kcal.m}^{-3}$ para $8.372 \text{ kcal.m}^{-3}$. Com relação à biorremediação, a microalga *Scenedesmus disciformis* foi capaz de remover 99,3% do nitrogênio amoniacal e 99,2% da concentração de fósforo do efluente suíno. Os resultados demonstram o potencial das microalgas para purificar biogás e biorremediar efluentes, diminuindo os custos de produção concomitantemente a produção de biomassa microalgal.

Palavras-Chave: biogás, microalgas, efluentes, biorremediação, *airlift*.

INTRODUÇÃO

A crise energética enfrentada pelo mundo tem sua origem no esgotamento previsível das fontes de energia atualmente disponíveis, podendo ser citadas o petróleo, o gás e o carvão. Em um curto período de tempo, esses recursos produziram grandes concentrações de poluentes, precursores de diversos problemas ambientais enfrentados pela humanidade.

Diante desse cenário, a utilização de fontes renováveis de energia se mostra uma opção promissora para contornar a crise atual. O biogás produzido a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos biológicos é uma mistura de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e vários hidrocarbonetos menores. Apresenta-se como um potencial combustível para geração de energia e pode ser utilizado com os mesmos padrões do gás natural fóssil quando purificado.

A presença de altas concentrações de CO₂ faz com que o biogás seja mais custoso para ser comprimido e transportado em comparação ao gás natural. Além disso, a captura do CO₂ presente no biogás pode melhorar a eficiência do motor de combustão. Várias estratégias de investigação sobre o sequestro de CO₂ têm sido realizadas, incluindo métodos físicos, químicos e biológicos.

O CO₂ pode ser biologicamente convertido em matéria orgânica por microrganismos fotossintetizantes, como as microalgas, e essa matéria pode ser transformada em produtos de alto valor agregado como o bioetanol, o biocombustível e os aminoácidos (PULZ e GROSS, 2004; SKJANES *et al.*, 2007). Quando comparadas às plantas terrestres, as microalgas apresentam maiores taxas de fixação de CO₂ (COSTA *et al.*, 2000). A fração lipídica da biomassa de microalgas produzida pode ser extraída e transesterificada para produção de biocombustíveis (MORAIS e COSTA, 2007). Os produtos presentes na biomassa, como proteínas, pigmentos e enzimas, podem ser comercializados com o objetivo de aumentar a viabilidade comercial de tais empreendimentos.

Apesar de todos os avanços tecnológicos nessa área, os custos de produção e de operação dos sistemas de produção de microalgas ainda são muito altos. A combinação da produção de microalgas e remoção de nutrientes de águas residuais se apresenta como alternativa para o crescimento desses organismos, eliminando a necessidade de meios sintéticos, reduzindo os custos de produção, paralelamente ao tratamento de passivos ambientais.

Neste estudo, os perfis de crescimento da microalga cultivada em concentrações de CH₄ e CO₂ foram avaliados, assim como os parâmetros físico-químicos e biológicos do processo. O processo de purificação do biogás foi aplicado com objetivo de aumentar o valor calorífico do gás e sua qualidade. Todos os experimentos foram realizados em ambiente externo e sem controle de temperatura e luminosidade, na cidade de Curitiba - PR.

METODOLOGIA

Neste trabalho foi utilizado um “*mix*” de microalgas com a predominância da espécie *Scenedesmus disciformis*. A manutenção e o repique das cepas, assim como a produção do inóculo, foram realizados em sala de cultivo climatizada.

Os cultivos experimentais foram realizados em escala laboratorial em reator modelo *airlift* com volume de trabalho de 12 L. O sistema foi instalado na parte externa do Núcleo de Pesquisa em Energia Autossustentável – NPDEAS no campus Centro Politécnico na Universidade Federal do Paraná, em ambiente sujeito a

variações climáticas (temperatura, iluminação e foto período). A concentração celular inicial foi da ordem de $400 \times 10^4 \text{ cel. mL}^{-1}$. A homogeneização e a circulação foram realizadas com ar e biogás utilizando compressor da marca *Schulz*, com vazão de 1 L. min^{-1} . Estabeleceu-se o período de 15 dias de cultivo para avaliação dos experimentos.

Para o cultivo das microalgas foram utilizados meios de cultura alternativos provenientes da biodigestão de resíduos suíno, bovino e esgoto sanitário. Para utilização como meio de cultura, os efluentes foram diluídos nos cultivos na proporção de 5% v/v para efluente suíno, 25% v/v para efluente esgoto sanitário e 30% v/v para efluente bovino.

Para a produção de biogás, foi utilizado o biodigestor modular de fluxo ascendente. O biogás produzido diariamente foi coletado na parte superior do reator e armazenado em balão após o pré-tratamento de dessulfurização química. O biogás foi então comprimido para ser utilizado nos experimentos propostos. A determinação dos principais constituintes do biogás foi realizada através do “Kit Biogás” desenvolvido pela *EMBRAPA Suínos e Aves* e a *Alfakit*, segundo método desenvolvido por Kunz e Sulzbach (2007).

Para determinar a capacidade de remoção de CO_2 presente no biogás e sua purificação pelo cultivo de microalgas em fotobiorreator, a cultura de microalgas foi aerada com 100% de biogás a uma taxa de fluxo de 1 L. min^{-1} . Amostras de entrada e saída de biogás foram coletadas para avaliação a cada 30 minutos até saturação total do gás em relação à concentração de dióxido de carbono inicial.

A avaliação dos cultivos foi realizada em função da determinação dos seguintes parâmetros: caracterização da cinética de crescimento, quantificação de biomassa seca, produtividade diária de biomassa seca e determinação de pH. Neste trabalho, após o processo de separação da biomassa de microalgas, o líquido clarificado recuperado, assim como o efluente suíno biodigerido escolhido para o teste de biorremediação, foram submetidos à avaliação de cargas de fosfato, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, DBO e DQO para determinação da biorremediação do efluente conforme metodologia do *Standard Methods*, 2005.

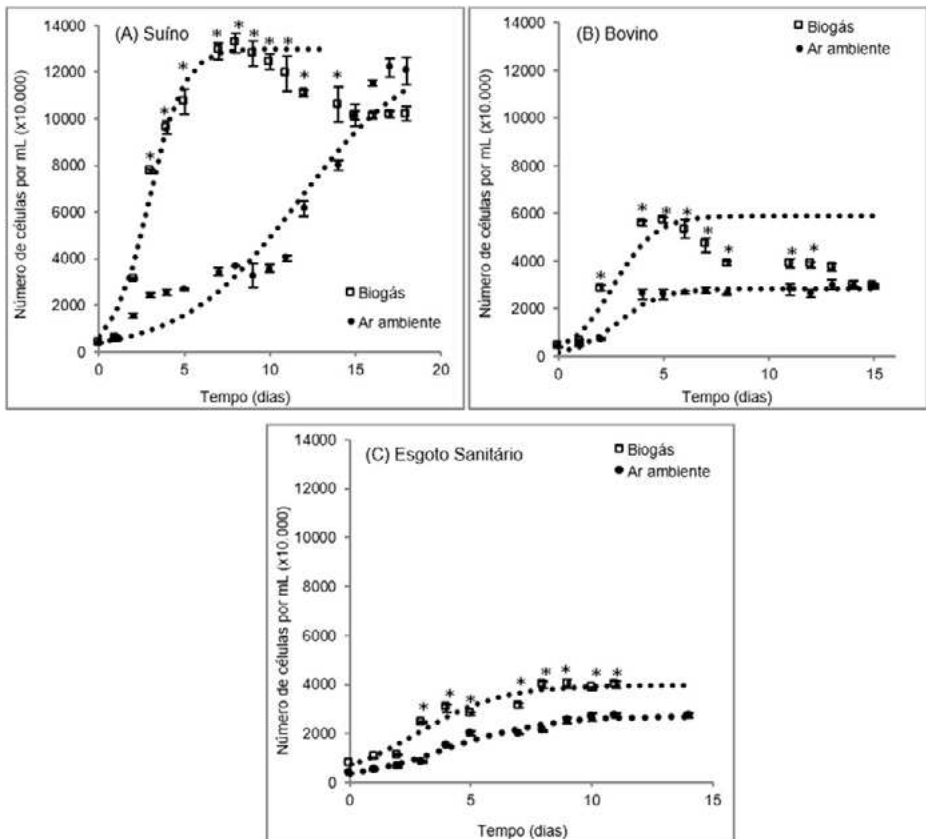
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de crescimento celular do *mix de Scenedesmus disciformis* aerado com a mistura de biogás e ar ambiente em comparação ao cultivo utilizando apenas ar ambiente em diferentes meios de cultivos (suíno, bovino e esgoto sanitário). Os resultados ilustrados demonstram o melhor desempenho da microalga cultivada com injeção de CO_2 proveniente da mistura biogás/ar ambiente em comparação ao crescimento apenas com ar ambiente.

A fase exponencial de crescimento dos cultivos com suplementação de CO₂ proveniente do biogás se deu logo no início do cultivo (2.º dia), demonstrando que a microalga cresceu mais nessa condição em relação aos ensaios que utilizaram apenas ar ambiente. A microalga apresentou maior crescimento celular no meio suíno, seguido do meio bovino e por seguinte o meio esgoto sanitário.

Os crescimentos celulares máximo alcançados nos cultivos aerados com biogás foram de $13.257 \times 10^4 (\pm 430)$ cel.mL⁻¹ no 8.º dia de cultivo no meio suíno, $5.337 \times 10^4 (\pm 400)$ cel.mL⁻¹ no 5º dia de cultivo no meio bovino e $4.020 \times 10^4 (\pm 183)$ cel.mL⁻¹ no 9º dia de cultivo no meio esgoto sanitário.

Figura 1 – Curvas de crescimento celular em diferentes meios de cultivo utilizando ar ambiente e biogás como fonte de carbono, mostrando os ajustes da equação logística (●●●) aos dados. (A) meio suíno; (B) meio bovino; (C) meio esgoto sanitário.

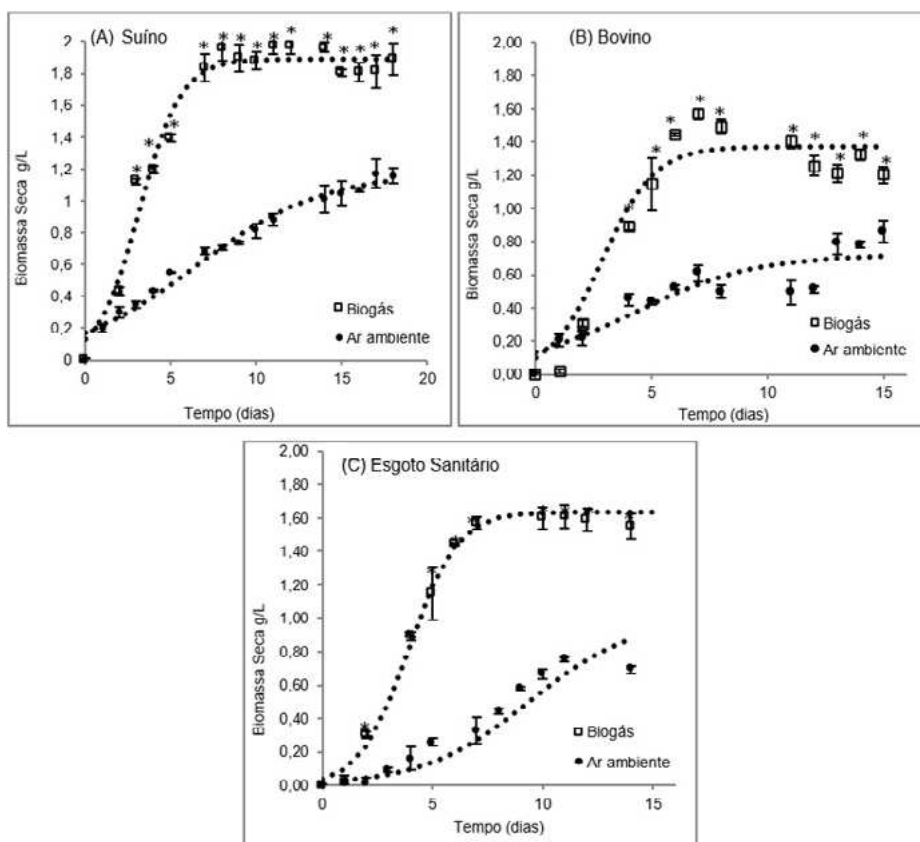


Fonte: O autor (2013).

Comparando os resultados com os controles que foram aerados somente com ar ambiente, percebe-se que a utilização do biogás como fonte extra de carbono interfere diretamente no crescimento da microalga. Tanto nos resultados de divisão celular quanto no aumento da biomassa, verificou-se que a fase inicial dos cultivos foi acelerada indicando a ótima adaptação da microalga às condições impostas e também a dependência do crescimento frente ao CO₂ disponível.

A maior concentração de biomassa alcançada foi obtida no meio suíno aerado com biogás, com concentração máxima de 2,0 (± 0,16) g.L⁻¹ ao 8.º dia de experimento, seguido pelo meio esgoto sanitário que alcançou 1,6 (± 0,17) g.L⁻¹ no 10.º dia e pelo meio bovino com 1,6 (± 0,22) g.L⁻¹ no 7.º dia de cultivo, ambos aerados com biogás (Figura 2).

Figura 2 – Comparação das curvas de biomassa seca em diferentes meios de cultivo utilizando ar ambiente e biogás como fonte de carbono, mostrando os ajustes da equação logística aos dados. (A) meio suíno; (B) meio bovino; (C) meio esgoto sanitário.



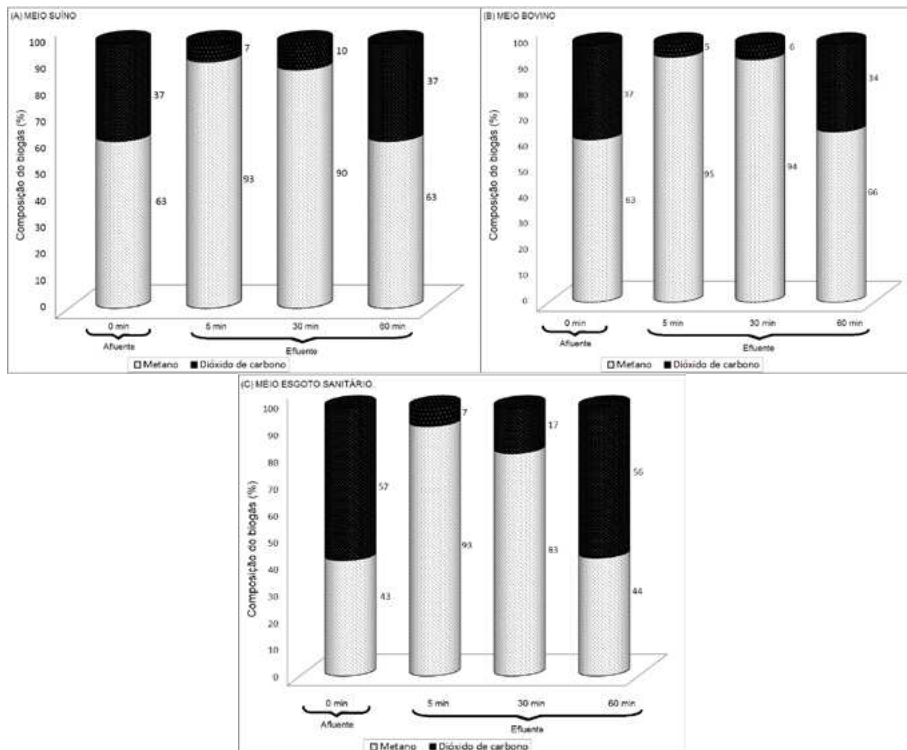
Fonte: O autor (2013).

A suplementação de uma fonte de carbono no sistema aumentou de forma relevante a produtividade em biomassa dos cultivos, demonstrando que a utilização de biogás como fonte de carbono é eficiente. Segundo Mata *et al.* (2010), cerca de 50% da biomassa seca das microalgas é composta por carbono e, na maioria dos casos, todo este carbono é obtido a partir do dióxido de carbono (RICHMOND, 2010). Assim sendo, a microalga *Scenedesmus disciformis* mostrou grande potencial na capacidade de fixação de CO_2 .

Purificação de biogás por microalgas

A capacidade de purificação do biogás pelas culturas de microalgas em fotobiorreator *airlift* se mostrou eficiente. A concentração de CH_4 presente no biogás aumentou após 5 minutos de injeção do gás em todos os experimentos realizados, estendendo-se por 30 minutos até a saturação do sistema. Foram detectadas reduções de CO_2 e uma proporção mais elevada de CH_4 após sua passagem pelo fotobiorreator (Figura 3).

Figura 3 - Purificação de biogás em cultivo foto autotrófico de microalgas. (A) meio suíno, (B) meio bovino (C) meio esgoto sanitário.

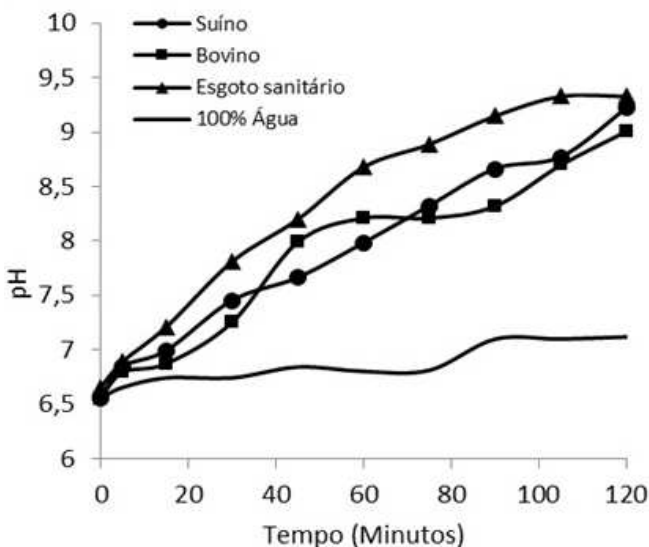


Fonte: O autor (2013).

Os resultados da remoção de CO₂ demonstram a eficiência na remoção de CO₂ no sistema num período de 30 minutos, ocorrendo a redução na capacidade de eliminação de carbono inorgânico após esse tempo. Nesse sentido, o aumento da escala se apresenta como saída para se atingirem níveis maiores de purificação e de tempo de operação.

Dentre os métodos com a finalidade de purificar o biogás, a absorção por lavagem de gás é o que mais se assemelha ao processo realizado neste trabalho, pois utiliza a água como um absorvente do CO₂, que é descartado após o processo de purificação. Nesse trabalho, o sistema biológico de purificação de biogás tem como foco a fixação instantânea do CO₂. Para ter a confirmação do consumo de CO₂ pelas microalgas nos ensaios realizados, foram feitas medições do pH a cada 10 minutos após o processo de purificação (Figura 4).

Figura 4 - Comportamento do pH após a purificação do biogás por cultivo de microalgas em diferentes meios de cultivo.



Fonte: O autor (2013).

Conforme a Figura 4, percebe-se o aumento do pH durante 120 minutos nos cultivos com microalgas, alcançando o pH=9,0 depois deste período. Por outro lado, na ausência de microalgas no sistema o pH não apresentou alteração. A recuperação do pH após a purificação se deve ao fato de que o CO₂ dissolvido no cultivo foi utilizado pelas células de microalgas para o crescimento por meio da fotossíntese.

Segundo NOGUEIRA (1986), o poder calorífico do biogás é dependente da concentração de metano no gás. Frequentemente, o valor para o biogás com 60%

de metano é de 5.500 kcal.m⁻³. Entretanto, após os processos de purificação, o valor pode se aproximar ao do metano puro, ou seja, 9.000 kcal.m⁻³.

O valor calorífico do biogás foi estimado tendo em conta a percentagem de metano existente no biogás. Em se tratando do poder calorífico, o biogás *in natura* apresentou uma concentração média de 61% de CH₄ com poder calorífico de 5.592 kcal.m⁻³, enquanto o biogás purificado apresentou uma concentração média de 91% de CH₄ com poder calorífico de 8.372 kcal.m⁻³.

A Tabela 1 apresenta as características do biogás antes e depois da purificação com cultivos de microalgas.

Tabela 1 – Características do biogás antes e depois da purificação.

Meio de cultura utilizado	Efluente suíno			Efluente bovino			Efluente esgoto sanitário		
Tempo de purificação (minutos)	5	30	60	5	30	60	5	30	60
% Afluente de CO ₂	37	37	37	37	37	37	43	43	43
% Efluente de CO ₂	7	10	37	5	6	34	7	17	56
% Eficiência de remoção de CO ₂	82	77	9	86	84	7	88	71	1
% Afluente de CH ₄	63	63	63	63	63	63	57	57	57
% Efluente de CH ₄	93	90	63	95	94	66	93	83	4
% Eficiência de enriquecimento de CH ₄	82	77	9	86	84	7	88	71	1
Valor calorífico do biogás “in natura” (kcal.m ⁻³)	5775	5775	5775	5775	5775	5775	5225	5225	5225
Valor calorífico do biogás purificado (kcal.m ⁻³)	8525	8525	5775	8708	8616	6050	8525	7608	4033
Ácido sulfídrico (ppm)	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Observou-se um aumento médio do poder calorífico de 2.780 kcal.m⁻³, o que representa um aumento de aproximadamente 33% no poder calorífico do biogás após purificação com cultivos de microalgas, aproximando-se do valor calorífico do metano puro. Desta forma, o sistema utilizado foi capaz de capturar o CO₂ presente no biogás, alcançando elevado nível no desempenho de purificação do biogás.

Biorremediação de efluentes

Os resultados experimentais obtidos confirmam que a espécie de microalga *Scenedesmus disciformis* pode contribuir ao processo de biorremediação de efluentes. Os valores médios da concentração de Fósforo, Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-) e Nitrogênio amoniacal (NH_3) no início e no final dos experimentos com a microalga *Scenedesmus disciformis* estão representados na Tabela 2. Para a determinação da biorremediação foi escolhido o cultivo em meio suíno com injeção de biogás, o qual apresentou maior produtividade em biomassa.

Tabela 2 –Biorremediação de efluente suíno após separação da biomassa de microalgas.

Nutrientes	Efluente Suíno 5% + Biogás (mg.L^{-1})		
	Quantidade Inicial	Quantidade Após o Cultivo	Remoção de Nutrientes (%)
Fósforo	5	<0,04	99,2
Nitrato (NO_3^-)	<0,125	0,19	---
Nitrito (NO_2^-)	<0,025	<0,01	60
Nitrogênio amoniacal (NH_3)	144	<1,00	99,3

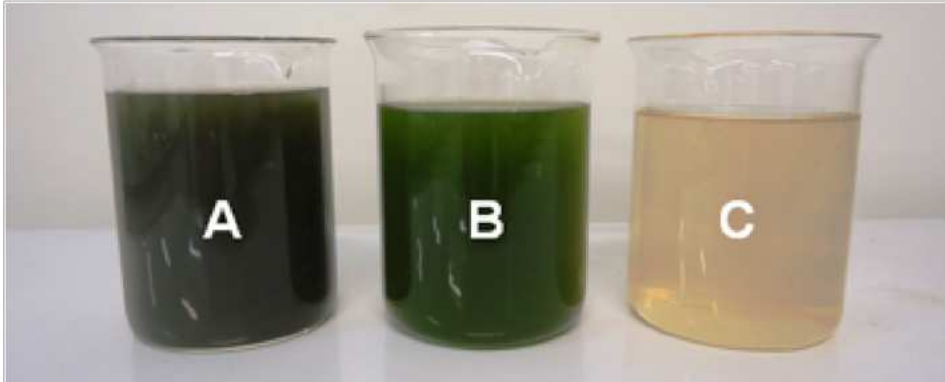
Fonte: O autor (2013).

Com a aplicação da biorremediação utilizando a microalga *Scenedesmus disciformis*, pôde-se observar uma eficiente remoção de nutrientes do efluente, chegando a 99,3% (143 mg.L^{-1}) de NH_3 ; 99,2% ($4,96 \text{ mg.L}^{-1}$) de Fósforo; 60% ($0,015 \text{ mg.L}^{-1}$) de NO_2^- . Assim, a utilização deste processo se mostrou eficiente para amenizar a poluição causada no ambiente pelo efluente, enquadrando-se aos padrões requeridos pela Resolução CONAMA n.º 430/2011, que complementa a Resolução CONAMA n.º 357/2005.

Além da concentração de nutrientes, avaliou-se a redução da DBO e da DQO do efluente após a recuperação das microalgas ao final do cultivo. De acordo com os resultados, houve uma redução de 96% da DBO (628 mg.L^{-1} para $23,3 \text{ mg.L}^{-1}$) e 91% da DQO (1262 mg.L^{-1} para 132 mg.L^{-1}).

A Figura 5 apresenta o aspecto da turbidez do efluente antes e depois do cultivo com microalgas. Percebe-se claramente uma grande redução na turbidez indicando a eficiência do processo de tratamento de efluentes com as microalgas.

Figura 5 – Aspecto da turbidez do efluente antes e depois do cultivo com microalgas. (A) efluente suíno + microalgas; (B) cultivo de microalgas 15 dias, (C) efluente final após recuperação da biomassa de microalgas do cultivo.



Fonte: O autor (2013).

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, o sistema biológico utilizando a microalga *Scenedesmus disciformis* foi capaz de purificar o biogás. O biogás purificado apresentou uma concentração média de 91% de CH_4 com poder calorífico de $8.372 \text{ kcal.m}^{-3}$. Os ensaios realizados com injeção de biogás apresentaram os resultados mais satisfatórios em relação à densidade celular e biomassa seca produzida. O crescimento celular máximo alcançado foi de $13.257 \times 10^4 (\pm 430) \text{ cel.mL}^{-1}$ no 8.º dia de cultivo no meio suíno. A maior concentração de biomassa foi obtida no meio suíno com suplementação de dióxido de carbono, com concentração máxima de $2,0 (\pm 0,16) \text{ g.L}^{-1}$ ao 11.º dia de experimento. Foi possível observar eficiente remoção de nutrientes do efluente suíno por parte da microalga *Scenedesmus disciformis*, chegando a remover 99,3% de NH_3 ; 99,2% de Fósforo e 60% de NO_2^- . A utilização deste processo permite amenizar a poluição causada no ambiente pelo efluente, enquadrando-se aos padrões requeridos pela Resolução CONAMA n.º 430/2011.

Para a continuação deste trabalho apresentam-se as seguintes sugestões: escalonamento da purificação de biogás para foto biorreatores de maior volume; exploração de subprodutos de interesse, como pigmentos e proteínas das microalgas; testar o CO_2 proveniente dos processos de combustão como fonte de carbono, a fim de diminuir custos nos cultivos.

REFERÊNCIAS

- COSTA, J. A. V.; LINDE G. A.; ATALA, D. I. P. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms. *World J Microbiol/Biotechnol*; 2000.16:15–8.
- KUNZ, A.; SULZBACH, A. Kit biogásportátil. Concórdia: EMBRAPA – CNPSA, 2007. 2 p. Disponível em: http://www.cnpsa.mbrapa.br/down.php?tipo=publicacoes&cod_publicacao=1068. Acesso em 20/02/2013.
- NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão a Alternativa Energética. Editora Nobel, São Paulo. 1986. 93p.
- MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. v. 14, n. 1, p. 217-232.
- MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V.; Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. And *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Journal of Biotechnology*, 2007. v. 129, p. 439-445.
- PULZ, O.; GROSS, W. Valuable products from biotechnology of microalgae. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2004. v.65, p.635-648.
- Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 053, p. 58-63, 18 mar. 2005.
- Resolução CONAMA n.º 430 de 13 de maio de 2011. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 mai. 2011.
- RICHMOND, A. (Ed.). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. John Wiley & Sons, 2008.
- STANDARD METHODS. *For the Examination of Water and Wastewater*, 21.^a ed. 2005
- SKJANES, K.; LINDBLAD, P.; MULLER, J. BiOCO₂ – A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO₂ while producing H₂ and high value products. *Biomolecular Engineering*, v. 24, p. 405-413, 2007.

CAPÍTULO 3

Terceiro colocado na Categoria "Mestrado e Doutorado" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

MÉTODO PARA SELEÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT) EM SUSBTITUIÇÃO ÀS VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO

Gustavo Meirelles Lima^{1}
Edevar Luvizotto Junior²
Bruno Melo Brentan³
Isabela Niedo Marchiori⁴*

¹ *Doutorando em Engenharia Civil – UNICAMP*

² *Professor Doutor em Engenharia Civil – UNICAMP*

³ *Doutorando em Engenharia Civil – UNICAMP*

⁴ *Bolsista de iniciação científica da Engenharia Civil – UNICAMP*

* limameirelles@gmail.com

RESUMO

Normas técnicas definem os limites operacionais para parâmetros hidráulicos, tais como velocidade ou pressão. Desta forma, o controle da pressão é um componente fundamental para a operação segura de sistemas de abastecimento de água, principalmente para reduzir as perdas físicas e o risco de interrupções, reduzindo os gastos com energia e manutenção. A topologia e a topografia do sistema podem definir algumas zonas de alta pressão e, neste caso, é comum o uso de válvula redutora de pressão (VRP) para manter as pressões do setor dentro dos padrões normalizados. No entanto, toda a energia disponível no fluido é dissipada através da perda de carga. Uma microturbina poderia ser utilizada em substituição à VRP

para produzir energia elétrica e controlar a pressão. Em geral, a potência disponível nestes locais é inferior a 100 kW, de modo que o uso de bombas funcionando como turbinas (BFT) é recomendado para reduzir o investimento. Devido à operação dinâmica ao longo de um dia, a BFT deverá operar sob diferentes condições de vazão e pressão. Essa variação afetará sua eficiência e a perda de carga inserida, o que dificultaria a utilização de métodos convencionais para seleção da máquina. Assim, este trabalho propõe um método para a seleção de BFTs que operem em substituição às VRPs. O método é baseado na maximização da energia produzida, restrita aos limites de pressão em cada nó da rede. Para resolver este problema, a técnica de otimização *Particle Swarm Optimization* (PSO) é utilizada e as curvas características completas de bombas no plano Suter, disponíveis na literatura, são utilizadas para simular a máquina. Além disso, o método também é capaz de identificar qual o melhor trecho da rede para a instalação da BFT. O método foi aplicado em duas redes e os resultados foram comparados com a operação de uma VRP.

Palavras-Chave: bombas funcionando como turbinas, energia renovável, controle de pressão, vazamentos.

INTRODUÇÃO

Uma das questões mais importantes para a operação das redes de abastecimento de água é o controle de pressão, fundamental para reduzir o volume de vazamentos e evitar o rompimento de adutoras. A topografia e a topologia do sistema definem zonas de alta e de baixa pressão. Normas técnicas definem os limites máximos e mínimos aceitos para a operação. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR12218 (ABNT, 1994) estabelece que a pressão em uma rede de abastecimento deve permanecer entre 10 mca (pressão dinâmica) e 50 mca (pressão estática). Nas zonas de baixa pressão, boosters com inversores de frequência podem ser instalados para manter pressões adequadas na rede. Já para as zonas de alta pressão, é comum o uso de válvulas redutoras de pressão (VRP), capazes de manter uma pressão de entrada no setor suficiente para que o nó crítico mantenha-se com a pressão mínima desejada.

Entretanto, do ponto de vista energético, as VRPs dissipam energia de pressão ao adicionarem ao sistema uma perda localizada. Essa perda de energia antagoniza-se com os preceitos modernos de uso racional de recursos. Sob essa ótica, a energia de pressão poderia ser utilizada para acionar uma turbina acoplada a um gerador, produzindo energia elétrica e mantendo o compromisso da redução da pressão no setor. Devido à baixa potência encontrada nestes locais, o uso de turbinas convencionais não é viável. Uma alternativa é a utilização de bombas funcionando como turbina (BFT), que apresentam baixo custo e boa eficiência. Ramos *et al.* (2009) mostraram um comportamento similar entre a BFT e a VRP, dando indicativos da viabilidade do emprego desta solução. Entretanto, Marchis & Freni (2015), ao realizarem simulações em perío-

do extensivo, observaram que, em períodos de baixo consumo, a BFT não conseguiu inserir uma perda de carga suficiente para reduzir a pressão a padrões aceitáveis. Jafari *et al.* (2015) obtiveram resultados com a BFT muito próximos à VRP em um sistema no Irã, onde a variação de demanda ao longo do dia não era muito significativa. Carra-vetta *et al.* (2014) propuseram como alternativas para melhorar o controle de pressão a geração em rotação variável ou a adição em paralelo de uma VRP, enquanto que Budris (2011) sugeriu o uso de múltiplas BFTs em paralelo para poderem operar em diferentes arranjos, segundo as variações de consumo diário.

Apesar das evidentes vantagens do emprego das BFTs, a seleção da máquina para essa finalidade ainda é uma tarefa complexa. Os métodos tradicionais baseados no rendimento máximo em sua operação como bomba, ou na rotação específica em sua operação como turbina (Jain & Patel, 2014), são válidos apenas para o ponto de máxima eficiência da máquina. Sem o conhecimento da curva característica (carga x vazão), não é possível avaliar os benefícios em uma rede de abastecimento de água, uma vez que há uma grande variação da carga disponível em função do consumo. Além disso, a operação da BFT deve buscar primeiramente o controle de pressão, de forma que o abastecimento aos consumidores não seja prejudicado, sendo a produção de energia um benefício adicional ao sistema.

Nesse contexto, este trabalho propõe um método para seleção e localização de BFTs para operarem em redes de distribuição de água. O método é baseado na maximização do benefício, isto é, na redução do volume de vazamentos ao mesmo tempo em que se produz energia. Como restrição operacional, o método impõe que a BFT seja capaz de manter a pressão em cada nó da rede dentro dos limites estabelecidos. A vazão e carga da BFT em seu ponto de máximo rendimento, assim como o local onde ela deverá ser instalada, são definidos com o emprego de otimização Particle Swarm Optimization (PSO). A partir do ponto de operação ótimo, é obtida a rotação específica da máquina, selecionando a curva mais próxima. Para tanto, empregou-se o conjunto de curvas características completas de bombas, representadas no plano de Suter (Torley & Chaudhry, 1986). Na etapa final, a rede é simulada com a máquina selecionada para calcular a energia produzida e as pressões nos nós. O método foi aplicado em duas redes fictícias, disponíveis em Gomes (2011), e os resultados obtidos foram comparados com a operação decorrente do emprego de uma VRP.

METODOLOGIA

Modelagem das bombas funcionando como turbina

A caracterização das máquinas hidráulicas é feita através de curvas que relacionam carga, vazão, torque e rotação. Da alternância dos sinais destas grandezas é possível definir oito zonas distintas de operação, que podem ser representadas através do plano de Suter (Wylie & Streeter, 1983). Como os valores de vazão e rotação não

MÉTODO PARA SELEÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT)...

se aproximam simultaneamente de zero, os coeficientes de carga e torque, WH e WB respectivamente, podem ser representados como uma função destas variáveis, facilitando seu uso em rotinas computacionais. O Gráfico 1 apresenta uma das quatorze curvas disponibilizadas no trabalho realizado por Torley & Chaudry (1986). A parte em vermelho da curva mostra a zona de operação como turbina. Para cada uma das curvas disponíveis, a zona de operação como turbina foi identificada, e, considerando que a rotação de trabalho será a nominal, foram obtidas novas curvas relacionando os coeficientes adimensionais de vazão q e de carga h , como mostra o Gráfico 2. A nova representação permitiu o ajuste na forma de uma curva de potência (Equação 1), que permite — bastando que seja escolhido o par carga e vazão para o ponto de máximo rendimento — a obtenção do traçado da curva característica com base na curva disponível de rotação específica mais próxima.

Gráfico 1 – Curvas de carga e momento no plano de Suter.

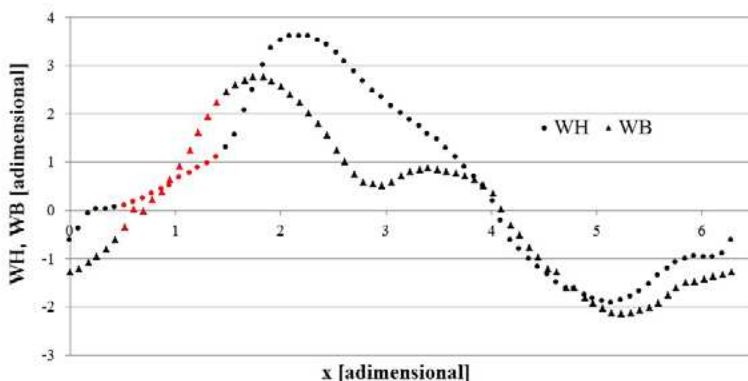
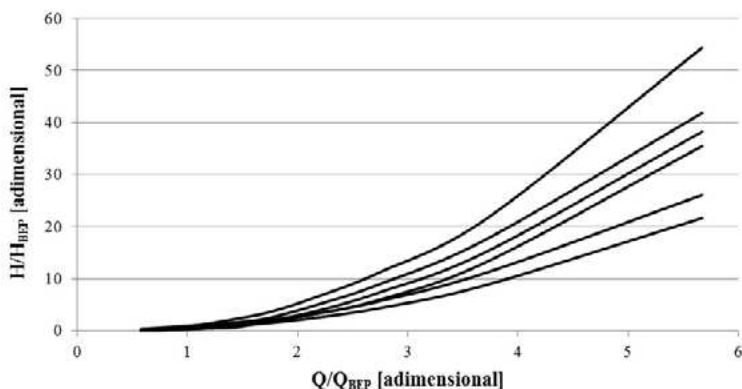


Gráfico 2 – Curvas características adimensionais na zona de turbina.



$$h = a \cdot q^b \quad (1)$$

em que:

a, b [adimensional] – coeficientes de ajuste da curva;

h [adimensional] – coeficiente de altura de carga;

q [adimensional] – coeficiente de vazão.

Procedimento de Seleção da BFT

A seleção e a localização da BFT é baseada na maximização do benefício, definida pela redução do volume de vazamentos e a maximização da energia produzida. Assim, considerando-se as tarifas de energia e de água do local, a função objetivo é escrita da seguinte forma (Equação 2):

$$FO = \sum_{i=0}^{23} \left[t_e \cdot \frac{\gamma \cdot Q_i \cdot H_i \cdot \eta_i}{1000} + \sum_{j=1}^n t_a \cdot (Q_{j_1} - Q_{j_2}) \cdot 3600 \right] \quad (2)$$

em que:

FO [\$] - função objetivo a ser maximizada;

t_e [\$.kWh⁻¹] – tarifa de energia;

γ [N.m⁻³] – peso específico da água;

Q_i [m³.s⁻¹] – vazão que passa pela BFT no instante i ;

H_i [m] - variação de carga inserida pela BFT no instante i ;

η_i [adimensional] – rendimento da BFT no instante i ;

n [adimensional] – número de nós sujeitos à operação da BFT;

t_a [\$.m⁻³] – custo de produção da água tratada;

Q_{j_1} [m³.s⁻¹] – vazão de vazamento no nó j e no instante i antes da instalação;

Q_{j_2} [m³.s⁻¹] – vazão de vazamento no nó j e no instante i depois da instalação.

Como restrição, a pressão em cada um dos nós sujeitos à operação da BFT deve se manter acima do limite mínimo pré-estabelecido, conforme a Equação 3.

$$P_n \geq P_{min} \quad (3)$$

em que:

p_n [mca] – pressão no nó n ;

p_{min} [mca] – pressão mínima estabelecida por norma.

Para a solução do problema de otimização formalizado anteriormente, optou-se pelo emprego da técnica meta-heurística baseada no comportamento de grupos, PSO, por sua robustez e facilidade de implantação. De acordo com Silva *et al.* (2010), o processo de busca do método baseia-se no comportamento de grupos de pássaros, que iniciam a busca de alimentos de forma aleatória, mas que rapidamente se organizam e criam um padrão de busca coletivo. Ao longo do tempo (iterações) os vetores posição, X , e velocidade, V , de cada partícula são atualizados com base na inércia em sua melhor posição já encontrada, P , e na melhor posição já encontrada pelo enxame de partículas, G . Assim, por meio das Equações 4 e 5, uma nova solução é encontrada a cada iteração.

$$V_i^{k+1} = \omega \cdot V_i^k + c_1 \cdot rand_1 \cdot \frac{(P_i^k - X_i^k)}{\Delta t} + c_2 \cdot rand_2 \cdot \frac{(G - X_i^k)}{\Delta t} \quad (4)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \cdot \Delta t \quad (5)$$

em que:

V – velocidade da partícula;

X – posição da partícula;

P – melhor posição ocupada pela partícula; G – melhor posição ocupada pelo grupo.

Com os coeficientes de ponderação de cada parcela componente dado por:

ω – fator de inércia; c_1 – coeficiente cognitivo; c_2 – coeficiente social.

Estudo de Caso

Para avaliar o método proposto, utilizou-se a rede fictícia apresentada na Figura 1, adaptada a partir da rede proposta por Gomes (2011). Todas as tubulações possuem 0,01 mm de rugosidade e a elevação de todos os nós é igual a zero. Esta

rede está sujeita à variação da demanda apresentada pelo Gráfico 3. Adicionalmente, considerou-se que em todos os nós, além da demanda, existe uma parcela de vazamento, calculada em função da carga deste nó (Equação 6). Assim, também é possível comparar a eficiência da BFT na redução do volume de vazamentos.

$$Q_i = K \cdot \sqrt{H_n} \tag{6}$$

em que:

Q_i [$L \cdot s^{-1}$] – vazão do vazamento;

K [$L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1/2}$] – coeficiente de ajuste;

H_n [mca] – carga no nó.

Figura 1 – Esquema da rede de abastecimento de água para estudo de seleção de Bombas Funcionando como Turbinas.

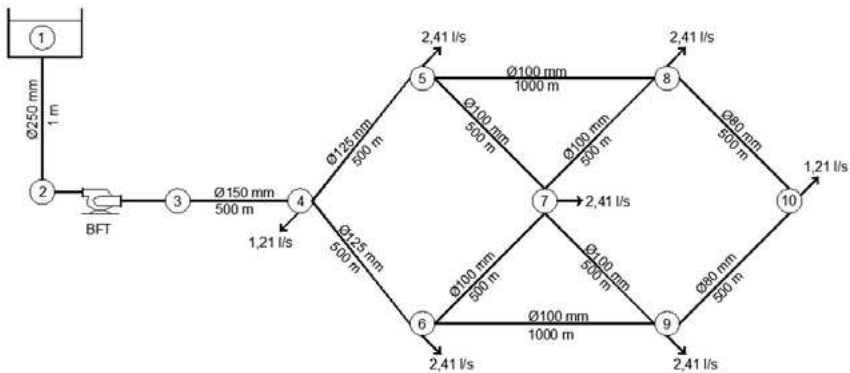
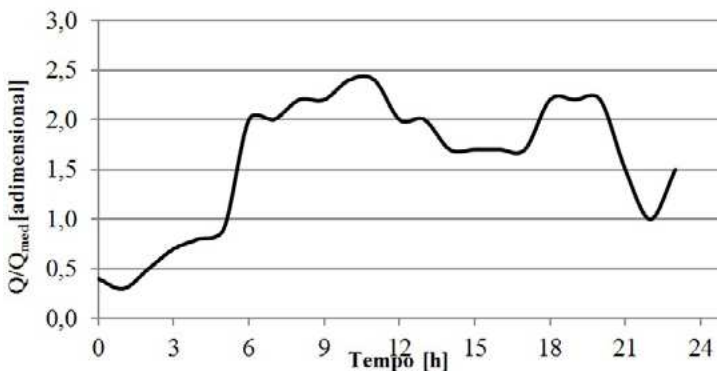


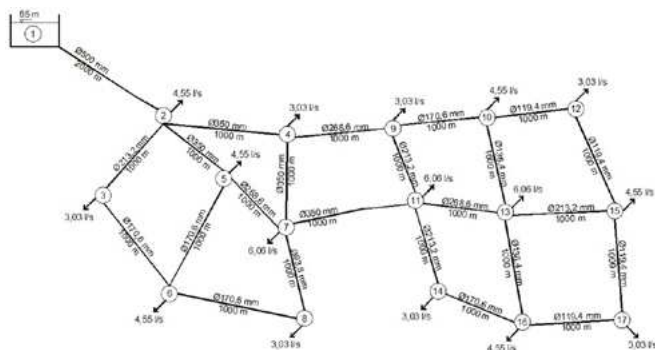
Gráfico 3 – Curva de demanda da rede de abastecimento de água.



MÉTODO PARA SELEÇÃO DE BOMBAS FUNCIONANDO COMO TURBINA (BFT)...

Uma segunda rede, também utilizada por Gomes (2011) (Figura 2), foi estudada para verificar a capacidade do modelo em identificar o melhor trecho para se instalar a BFT. A curva de demanda é a mesma apresentada no Gráfico 3, e todas as tubulações possuem coeficiente de Hazen-Williams de 130.

Figura 2 – Esquema da rede de abastecimento de água para estudo de localização de Bombas Funcionando como Turbinas.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seleção de Bombas Funcionando como Turbinas

Conforme estabelecido pela NBR12218 (1994), o nó crítico da rede (nó 10) deve se manter com pelo menos 10 mca durante o período de 24 horas. Assim, a VRP foi ajustada para manter uma pressão de saída em 33 mca. Com esta configuração, obteve-se uma redução de 156,4 m³ no volume de vazamentos diário. Posteriormente, foi feita a escolha de uma BFT para substituir a VRP. Nesse cenário, o ponto de operação da máquina avaliada foi: $Q = 29,11 \text{ L.s}^{-1}$ e $H = 21,32 \text{ mca}$. O Gráfico 4 ilustra o comportamento da função objetivo, demonstrando a necessidade de uma técnica robusta de otimização, justificando a escolha do PSO. O Gráfico 5 mostra a evolução da função objetivo com o número de iterações.

Gráfico 4 – Função objetivo do problema de seleção da BFT.

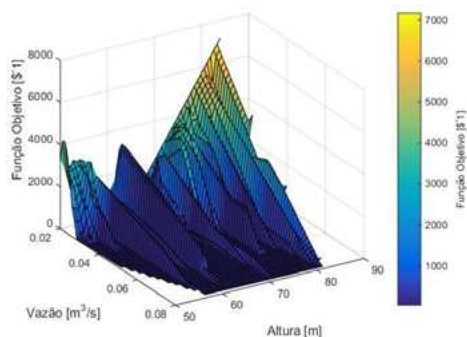
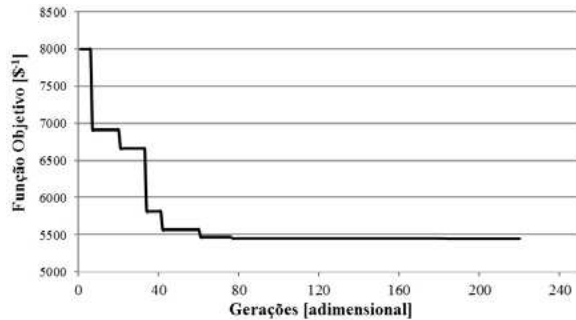
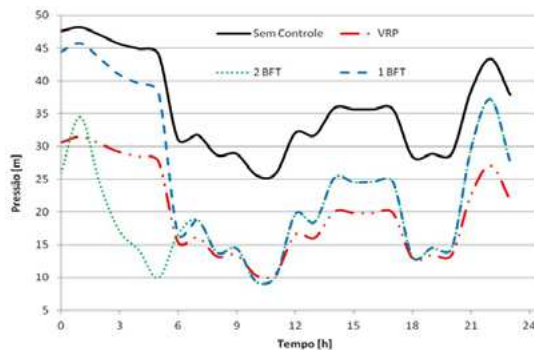


Gráfico 5 – Comportamento da função objetivo com o número de iterações.

Observou-se para esse cenário que a seleção da máquina foi feita para que sua operação ocorresse no período de maior consumo (6 às 23 horas), quando há mais energia disponível. Entretanto, nos períodos de baixo consumo, não há geração de energia e, conseqüentemente, a pressão na rede mantém-se elevada. Desta forma, apesar de a BFT gerar 78 kWh, o volume de vazamentos diário foi reduzido em apenas 62,5 m³, o que equivale a apenas 39,94 % do volume reduzido pela VRP.

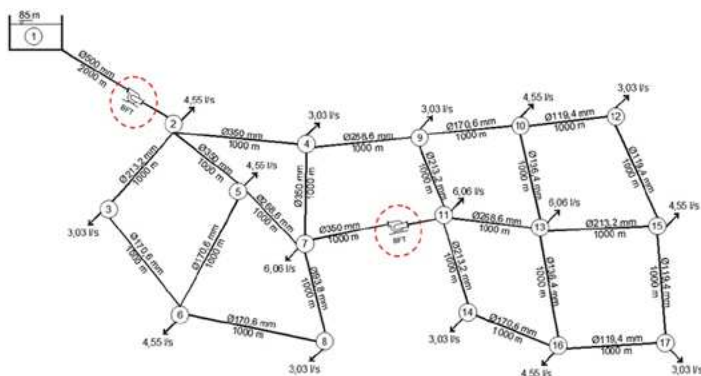
Para melhorar o controle de pressão feito pela BFT, considerou-se o uso de uma segunda máquina em paralelo, para atuar apenas no período entre 0 e 5 horas. Assim, uma nova seleção foi feita, resultando em uma máquina com o seguinte ponto de operação: $Q = 9,51 \text{ L.s}^{-1}$ e $H = 30,85 \text{ m}$. Neste novo cenário, houve um acréscimo de 16,1 kWh de energia produzida e 23,7 m³ de redução do volume de vazamentos. Ainda assim, a VRP apresentou um melhor controle sobre o volume de vazamentos. Entretanto, é necessário avaliar de forma integrada os benefícios econômicos da geração de energia e da redução de vazamentos, uma vez que, sob condição de elevada tarifa de energia, mesmo com menor eficiência de redução de perdas, a conjugação pode ser mais atrativa. O Gráfico 6 apresenta a pressão no nó crítico para cada uma das situações estudadas.

Gráfico 6 – Pressão do nó crítico para os cenários avaliados.

Localização de Bombas Funcionando como Turbinas

Para o estudo de localização de BFTs em redes de abastecimento de água, considerou-se o uso de duas máquinas para o controle de pressão. A Figura 3 apresenta a localização das duas BFTs. Os trechos escolhidos são os mesmos encontrados por Gomes (2011) para a instalação de VRPs, ou seja, o modelo criado conseguiu identificar os melhores locais para posicionar o controle de pressão. Entretanto, como observado anteriormente, o ponto de operação das máquinas também foi escolhido com base no período de maior consumo, sendo incapaz de reduzir a pressão durante o período noturno.

Figura 3 – Localização das Bombas Funcionando como Turbinas.



CONCLUSÕES

O método apresentado sugere que a seleção da BFT ocorra para o momento de vazão máxima observada no período, pois nestas condições, apesar de a queda de pressão ser reduzida, a energia produzida e a redução no volume de vazamentos são maiores. Além disso, o método também conseguiu identificar a melhor localização para a instalação de múltiplas BFTs para controle de pressão, otimizando a operação conjunta das máquinas.

Ainda que as BFTs apresentem comportamento de queda de pressão similar às VRPs, não é possível assegurar uma pressão de saída constante, fazendo com que o volume de vazamentos seja elevado em períodos de baixo consumo. Assim, a atratividade do investimento será dependente da tarifa de energia, muitas vezes superior aos custos de produção de água em locais que operem por gravidade, o que pode viabilizar a implantação da micro central. Nestas situações e razões, o método apresentado pode ser uma ferramenta de grande utilidade para a definição de soluções para controle de pressão e geração de energia em redes de abastecimento de água.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12218 – Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público, 1994.
- BUDRIS, A. R. Multiple “Pump As Turbine” Installations Keep Efficiency High Over Wide Flow Range, *Water World*, 2011.
- CARRAVETTA, A.; FECAROTTA, O.; SINAGARA, M.; TUCCIARELLI, T. Cost-benefit analysis for hydropower production in water distribution networks by a pump as turbine, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 140, no 6, pp. 1-8, 2014.
- GOMES, R. J. Modelação Matemática como Ferramenta de Gestão e Exploração de Sistemas de Distribuição de Água, Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, 2011.
- JAFARI, R.; KHANJANI, M. J.; ESMAEILIAN, H. R. Pressure Management and Electric Power Production Using Pumps as Turbines, *Journal of American Water Works Association*, Vol. 107, No. 7, 2015.
- JAIN, S. V., PATEL, R. N., Investigations on Pump Running in Turbine Mode: A Review of the State-of-the-Art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No. 30, pp. 841-868, 2014.
- MARCHIS, M.; FRENÍ, G. Pump as turbine implementation in a dynamic numerical model: cost analysis for energy recovery in water distribution network, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 16, N° 1, 2015.
- RAMOS, H. M., BORGIA, A., SIMÃO, M. New design solutions for low-power energy production in water pipe systems, *Water Science and Engineering*, Vol. 2, N° 4, pp. 69-84, 2009.
- SILVA, A. F.; LIMA, B. S. L. P.; LACOB, B. P.; LEMONGE, A. C. C.; BARBOSA, H. Optimization problems solution with restrictions via a bio-inspired algorithm using an adaptive penalty strategy (*in Portuguese*). *In*: IX Simpósio de Mecânica Computacional, 2010.
- TORLEY, A. R. D.; CHAUDHRY, M. H. Pump characteristics for transient flow analysis. *In*: Pressure Surge and Fluid Transients (ed. B. Group), pp. 461– 476, 1986.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. Fluid Transients. Michigan – EUA, Thomson Shore, 1983.

CAPÍTULO 4

Primeiro colocado na Categoria "Graduação e Especialização" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM BOMBEAMENTOS DE ÁGUA TRATADA

*Maiquel Auri Lamb¹**

João Paulo Minussi²

¹ Especialista em Eficiência Energética – UFSM

² Ph.D. em Engenharia Elétrica, Professor Adjunto – UFSM

* mauri@comusa.rs.gov.br

RESUMO

Esta pesquisa demonstra, a partir de levantamento bibliográfico e estudo de caso em uma empresa de saneamento básico no estado do Rio Grande do Sul, a redução no consumo de energia elétrica promovida pela automação e otimização operacional de um bombeamento de água tratada. Além disso, foram avaliados custos e indicadores financeiros como Valor Presente Líquido (VPL) e Tempo de Retorno Simples (*Payback* Simples) do projeto de eficiência energética. Esse sistema de elevação de água teve seu controle de pressão e vazão aperfeiçoado através da adoção de inversor de frequência, sensores de pressão e vazão, além de sua incorporação ao sistema de gerenciamento operacional remoto da empresa de saneamento básico. Do mesmo modo, uma de suas bombas antigas foi substituída por um equipamento

de maior rendimento mecânico e elétrico que, juntamente com um novo arranjo hidráulico e sistema de pressurização em linha, possibilitou abastecer uma região com menor custo, maior qualidade e eficiência energética.

Palavras-Chave: eficiência energética, bombeamento, automação.

INTRODUÇÃO

De todo o montante da energia consumida no planeta, cerca de 2% a 3% são utilizados no saneamento básico, mais precisamente nos bombeamentos de água bruta e tratada. Reduzindo-se as perdas, aumenta-se a eficiência do sistema, pois o consumo de energia elétrica está ligado diretamente ao volume bombeado, representando em torno de 0,6 kWh por metro cúbico de água tratada. Diminuindo-se o indicador de perdas e incentivando o uso consciente da água, tem-se uma queda relevante no custo da energia elétrica, visto que a diminuição do volume de água recalçada leva a uma diminuição no consumo de energia elétrica (GONÇALVES, 2009).

No Brasil, o saneamento básico também consome cerca de 3% da energia total consumida no país. Dentro destes, de 90% a 95% são destinados para alimentação de bombas e motores elétricos. Estes, em sua maioria, possuem baixo rendimento elétrico e capacidade sobre-dimensionada, operando muitas vezes em horários de ponta do sistema elétrico. Tais fatores, em conjunto com as perdas físicas de água (40% a 60%) verificadas nas empresas de saneamento, acabam elevando as tarifas de dois serviços essenciais: água e eletricidade (GONÇALVES, 2009).

Uma empresa de saneamento básico apresenta diversos sistemas e áreas potenciais para estudos de eficiência energética. Um dos principais sistemas, senão o mais importante, é o bombeamento de água, seja bruta ou tratada. É o sistema em que ocorre o maior dispêndio de energia elétrica, dando ao fluido a energia hidráulica necessária para ser captado de um rio e enviado à Estação de Tratamento de Água (ETA) e posteriormente distribuído à população. Entretanto, os bombeamentos nem sempre são eficientes energeticamente.

O bombeamento de água tratada do bairro X, gerenciado pela autarquia de saneamento básico da região do Vale do Rio dos Sinos/RS, apresenta alguns aspectos que induzem a um elevado consumo de energia elétrica. Dentre eles, destacam-se a utilização de equipamentos (motobombas) com grande tempo de uso, conjuntos de acionamento/operação obsoletos e sistema de pressurização ineficiente.

No que se refere aos equipamentos, em sua maioria apresentando elevada vida média de operação, em torno de 20 anos, têm baixos rendimentos mecânicos/elétricos quando comparados aos equipamentos comercializados atualmente. Além

disso, os acionamentos são obsoletos, compostos basicamente por partidas em estrela-triângulo e diretas. O controle, em grande parte dos sistemas, se dá por meio de temporizadores e eletroboias que determinam os períodos de operação das bombas nas suas rotações máximas. Esse modo de operação, intermitente, provoca gradativamente danos e perda de eficiência ao isolamento elétrico dos motores elétricos.

Nesse contexto, as melhorias com foco em eficiência energética podem trazer maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de água à população a um custo menor de energia. Tais ações ganham mais força quando se analisam o contexto atual de escassez energética e o custo elevado de geração, muitas vezes decorrentes de fontes poluentes, e, portanto, toda forma de efficientização energética é de interesse para desacelerar a demanda crescente de energia elétrica no Brasil.

Desta forma podem-se levantar as seguintes questões: quais são as medidas necessárias para se aumentar a eficiência de um bombeamento de água tratada que apresenta essas deficiências? Quais os ganhos obtidos por meio da implementação dessas medidas e o impacto sobre os custos de energia elétrica? Coube ao trabalho proposto demonstrar os ganhos obtidos com ações de eficiência energética aplicadas em um bombeamento de água tratada. Além disso, foram avaliados os custos, o Valor Presente Líquido (VPL), o Tempo de Retorno Simples (*Payback* Simples) e, por fim, o impacto da substituição de uma moto bomba de tecnologia superior.

O estudo utilizou-se de pesquisa bibliográfica e estudo de caso em uma empresa de saneamento básico da região do Vale do Rio dos Sinos/RS para atingir os seus objetivos, demonstrando que pequenas estratégias de eficiência energética podem significar grandes reduções no consumo de energia elétrica e maior qualidade na distribuição de água tratada.

Variadores de frequência

O consumo de energia elétrica está fortemente atrelado à necessidade de fornecer energia hidráulica aos fluidos. Atualmente, em torno de 63% da aplicação de motores elétricos é destinado para este fim. Desta forma, existe um grande campo para promoção de meios mais eficazes e indispensáveis de controle de fluxo, tais como o controle variável, em detrimento aos métodos tradicionais, tal como o estrangulamento de válvulas, que aceleram o desgaste mecânico dos equipamentos e as perdas energéticas (MONTEIRO & ROCHA, 2005, SANTOS, 2007).

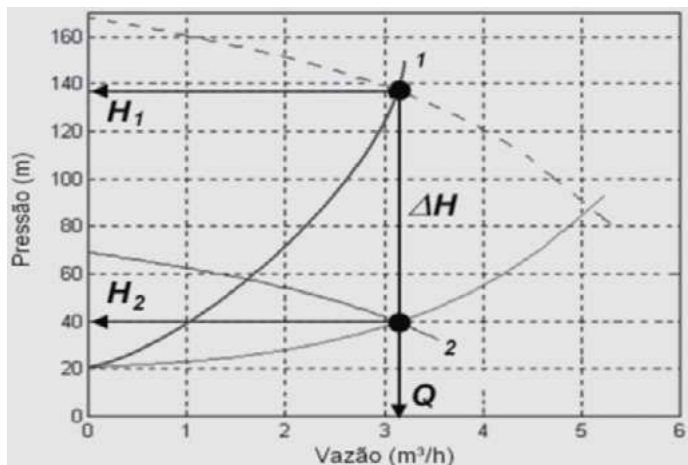
A restrição de válvulas é empregada devido à necessidade de um ajuste contínuo do ponto de funcionamento dos equipamentos, a fim de adequar a capacidade à demanda, que dificilmente é constante. Entretanto, o estrangulamento aumenta a

pressão interna da bomba e as perdas energéticas do sistema, o que acaba sendo uma ação não recomendada quando dispomos de métodos mais eficientes de controle, como a variação de vazão através da utilização de rotações variáveis (MONTEIRO & ROCHA, 2005, SANTOS, 2007, GONÇALVES, 2009).

O motor elétrico, mais precisamente o motor de indução trifásico, mais comumente utilizado na indústria, pode ter sua velocidade controlada através desses inversores estáticos que variam a frequência e a tensão de operação. A tensão e a frequência são modificadas proporcionalmente, para que o torque seja mantido constante em cada faixa de velocidade (MONTEIRO & ROCHA, 2005).

Os ganhos obtidos através da utilização de rotação variável em detrimento ao uso de válvulas que inserem perdas de cargas no sistema podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 - Operação com válvula de estrangulamento (1) e com rotação variável (2).



Fonte: Santos, 2007.

Para uma determinada vazão Q, ou se opera com restrição de válvula (característica tracejada), conduzindo ao ponto 1, ou se opera com redução de velocidade (característica contínua), levando ao ponto 2. Esses dois pontos correspondem a uma mesma vazão, porém com pressões diferentes, H1 e H2. Por estar a uma pressão maior, o ponto 1 resultará em uma maior potência demandada em relação ao ponto 2, e, conseqüentemente, a um maior consumo de energia. Se a válvula de estrangulamento for parcialmente fechada, a curva do sistema assume uma nova posição, interceptando a curva da bomba no ponto M (SANTOS, 2007).

Monteiro & Rocha (2005) apresentam a mesma correlação por meio das equações 1, 2 e 3, que trazem as principais relações entre essas grandezas.

$$N_2/N_1 = Q_2/Q_1 \quad (1)$$

$$(N_2/N_1)^2 = H_2/H_1 \quad (2)$$

$$(N_2/N_1)^3 = P_2/P_1 \quad (3)$$

em que:

Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ou $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$] - vazão;

H [mca] – altura manométrica;

N [rpm] – rotação;

P [W] – potência.

Os índices 1 e 2 referem-se à situação anterior e à situação posterior, respectivamente.

Em termos práticos, verifica-se que, reduzindo a rotação e, conseqüentemente, a vazão em 10%, a potência com adoção de inversor de frequência reduzirá em 27% da potência original (Equação 4) (MONTEIRO & ROCHA, 2005).

$$P_2 = P_1 * (N_2/N_1)^3 = P_1 * (0,9 * N_2/N_1)^3 = 0,73 P_1 \quad (4)$$

Portanto, vimos que a adoção de variadores de frequência representa uma grande ferramenta para os processos que requerem variação de parâmetros operacionais. Maior eficiência energética em um bombeamento pode ser obtida ao nos dirigirmos para esse tipo de controle variável da rotação do motor, adequando instantaneamente a capacidade da bomba à demanda do sistema.

Motores de alto rendimento

Os motores elétricos de indução sofrem com inúmeras perdas que afetam o seu rendimento. Destacam-se as perdas júllicas no estator e no rotor, as perdas magnéticas no ferro, as perdas mecânicas por atrito e ventilação, além de perdas suplementares (MONTEIRO & ROCHA, 2005).

Neste contexto, surgiram no mercado os motores de alto rendimento, que permitem perdas minimizadas, aumentando assim o rendimento elétrico em relação

ao motor de linha padrão. As perdas joule no estator podem ser minimizadas pela redução da resistência ôhmica (aumentando-se a seção de cobre dos condutores). Já o aumento das gaiolas condutoras auxilia na redução das perdas joule no rotor. A redução das perdas no ferro, por sua vez, é obtida através do emprego de materiais com baixas perdas magnéticas, além da utilização de maior volume de material para a redução das densidades de fluxo magnético. Por fim, as perdas mecânicas podem ser reduzidas por meio do projeto de ventiladores mais eficientes e rolamentos com menor atrito (MONTEIRO & ROCHA, 2005).

Um motor bem dimensionado é aquele que consome de 75% até 100% da sua potência nominal. Se for constatada a operação fora dessa faixa, a substituição é recomendada. Motores antigos e muitas vezes sobre-dimensionados que apresentam ocorrências frequentes de queima também têm as perdas aumentadas. Além disso, limitam-se a baixos rendimentos quando comparados aos motores atuais que permitem melhor distribuição térmica e isolamento elétrica (SANTOS, 2007).

Os critérios para escolha por um motor com rendimento superior em detrimento a um custo superior são essencialmente financeiros. Deverão ser avaliados indicadores relativos ao retorno de capital, a disponibilidade de recursos e de custo do capital de terceiros. Além disso, obviamente, deverá ser quantificada a economia prevista com a adoção da tecnologia superior (MONTEIRO & ROCHA, 2005).

Em suma, os motores de alto rendimento, apesar de serem mais caros que os motores de linha, são mais eficientes, consumindo menos energia para a mesma aplicação. Em consequência, o custo inicial de aquisição é compensado pelo menor custo operacional. Indicadores como o tempo de retorno de capital são baixos e, portanto, seu uso deve ser considerado, analisando-se todos os custos operacionais, e não somente o custo de aquisição do motor.

METODOLOGIA

A pesquisa pode ser classificada como sendo de natureza aplicada, já que será destinada para otimizar os bombeamentos de água tratada da empresa de saneamento básico. Com relação à abordagem, a pesquisa baseia-se fundamentalmente em interpretações quantitativas e, quanto aos procedimentos técnicos, foram utilizados pesquisa bibliográfica e estudo de caso. No que se refere aos objetivos, a pesquisa assume uma natureza exploratória, de modo que buscou maior familiaridade com o objeto em estudo, para a qual o pesquisador obteve informações pertinentes a uma estação de bombeamento. Quanto à estrutura lógica do método científico, o trabalho proposto segue o modelo indutivo, pois seu produto é fruto de um estudo de caso que exemplifica o objeto de estudo em uma empresa de saneamento básico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo de caso dividiu-se em duas partes distintas. Na primeira fase, foi analisada a influência no consumo energético promovida pela implementação do sistema *booster* e pela automatização do bombeamento. Já a segunda fase da pesquisa avaliou o impacto da substituição de um conjunto moto bomba com maior rendimento elétrico e hidráulico.

Primeira Fase

O bombeamento, que era composto por duas motobombas e acionamentos obsoletos, foi automatizado e integrado a um sistema de controle operacional remoto, passando a operar com um inversor de frequência. Além disso, foi realizado um rearranjo hidráulico. Os dois equipamentos eram alimentados diretamente de um reservatório de 5 metros de altura, visto na Figura 2, onde a pressão de sucção era muito baixa, o que afetava a operação das bombas. Para resolver este problema, foi interceptada a rede de entrada do reservatório inferior, ligando-a diretamente às bombas (Figura 3). Deste modo, os equipamentos passaram a dispor de valores superiores a 20 mca.

Figura 2 – Reservatório desativado.



Fonte: O autor, 2014.

Figura 3 –Interceptação da sucção.



Fonte: O autor, 2014.

Com o incremento de pressão, foi possível operar as bombas centrífugas no sistema de pressurização em linha (tipo *booster*) e com frequências menores, modulando seu funcionamento conforme a demanda da região. Com relação à variável pressão de saída do bombeamento, foi ajustado no inversor de frequência o *set-point* de 65 mca. Com este valor de pressão na saída do *booster*, o ponto crítico (a residência com menor pressão disponível em sua torneira), estabeleceu-se em uma faixa ótima de 10 a 15 mca. Com este *set-point* ajustado na programação, o inversor reduziria a frequência do motor assim que esse limite fosse atingido. Obtemos assim a melhor condição operacional para cada momento, reduzindo-se ao mínimo consumo de energia do sistema.

Outro ponto importante do trabalho desenvolvido foi a incorporação do respectivo bombeamento ao Centro de Controle Operacional (CCO) do sistema de adução e distribuição de água. O *software* utilizado é o Elipse SCADA®, *software* supervisor que informa as condições operacionais (vazão, pressão, frequência, entre outros) dos bombeamentos. Esse supervisor possibilita ajustes de parâmetros operacionais a qualquer momento do dia de forma instantânea.

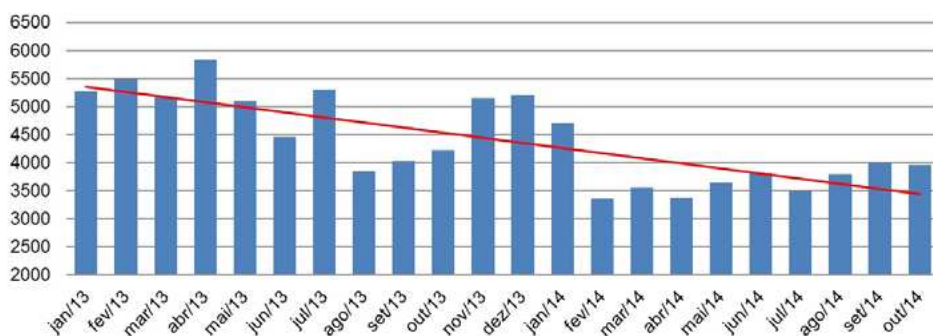
Com relação aos custos, foram necessários R\$9.952,00 para compor a automação efetivada em dezembro de 2013, inclusive com incrementos necessários para a transmissão de dados do bombeamento até o CCO. Após a implementação, foi constatado que a automatização, juntamente com o rearranjo hidráulico induziram a uma maior eficiência energética do *booster*. Os resultados obtidos através do projeto de conservação de energia da Fase 1 podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo de janeiro a outubro de 2013 com janeiro a outubro de 2014.

Mês	Consumo em 2013(kWh)	Consumo em 2014 (kWh)
Janeiro	5.281	4.707
Fevereiro	5.482	3.365
Março	5.174	3.565
Abril	5.836	3.375
Maió	5.098	3.641
Junho	4.464	3.803
Julho	5.313	3.495
Agosto	3.846	3.794
Setembro	4.024	3.996
Outubro	4.228	3.961
Total	48.476	37.702

Fonte: O autor, 2014.

Essa economia pode ser visualizada na Figura 4, onde se observa a tendência de queda no consumo energético no bombeamento analisado.

Figura 4 - Consumo kWh.mês⁻¹ de janeiro de 2013 a outubro de 2014.

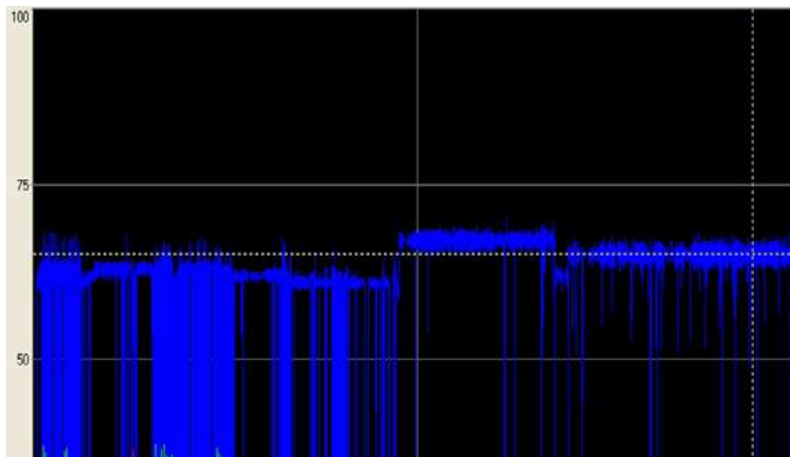
Fonte: O autor, 2014.

Observou-se que, em períodos iguais, em 10 meses de análise, o consumo energético diminuiu significativamente, apesar do contínuo aumento de economias abastecidas pelo bombeamento. O consumo total registrado no período de janeiro a outubro de 2013 foi de 48.476 kWh, bem superior à energia despendida de janeiro a outubro de 2014, que foi de 37.702 kWh. Portanto, no período analisado, houve uma

economia gerada de 11.044 kWh, que, multiplicados a uma tarifa média de R\$0,25, resulta em uma redução de R\$2.761,00. A economia gerada de aproximadamente R\$3.200,00 por ano (estimativa) faz com que o investimento de R\$9.952,00 tenha um *Payback* simples ($PB=I/E$ – Investimento/economia gerada) de aproximadamente 3,1 anos. Considerando-se uma taxa juros de 10% ao ano, uma vida útil de 10 anos dos equipamentos e a economia gerada no período, chegamos a um VPL positivo de R\$9.710,62.

No que se refere ao modo de operação, houve um incremento de qualidade na operação do bombeamento. A Figura 5 mostra um funcionamento mais constante do equipamento, com redução significativa das “repartidas” dos motores. A pressão de recalque, representada pela linha azul do gráfico, pode ser utilizada para exemplificar essa melhoria. Antes, a bomba acionava inúmeras vezes por dia, e atualmente seus desligamentos tornaram-se esporádicos.

Figura 5 - Regime de trabalho intermitente da bomba.



Fonte: O autor, 2014.

Segunda Fase

A segunda fase, ocorrida em outubro de 2014, consistiu na modernização do *booster* por meio da substituição de uma motobomba com maior rendimento. A comparação entre as características técnicas entre os equipamentos pode ser vista na Tabela 2. Os itens em destaque são aqueles com maior representação na análise de eficiência e demonstram a superioridade da nova motobomba.

Tabela 2 – Comparação entre motobombas.

Dados	Bomba antiga	Bomba nova
Potência(cv -11 kW)	15	15
Rotação (rpm)	3495	3520
Fator de serviço	1,15	1,15
Tensão (V)	380	380
Corrente (A)	22	21
Fator de potência	0,85	0,88
Vazão máxima (L.s ⁻¹)	10	14
Pressão máxima (mca)	70	72
Frequência (Hz)	60	60
Rendimento motor (%)	84,5	90,5
Rendimento bomba (%)	—	57,0

Fonte: O autor, 2014.

O investimento realizado foi de aproximadamente R\$3.400,00, referentes à aquisição da motobomba, mais o custo de R\$1.000,00 em novos acessórios, tais como válvulas de esfera de 4", conexões e extensões de tubulações de aço galvanizado. A Figura 6 traz as mudanças físicas visíveis no bombeamento.

Figura 6 – Bombeamento renovado.



Fonte: O autor, 2014.

A motobomba 2, apresentada à direita na Figura 6, iniciou sua operação em 14/10/2014 e alguns parâmetros já se destacaram quando comparados aos da motobomba 1 (esquerda Figura 6). Observou-se que a pressão de *set-point* (65 mca) é atingida pela motobomba 2 em frequências menores, com vazão superior e, conseqüentemente, um consumo de corrente inferior à da motobomba 1.

Comparando-se o consumo do bombeamento em novembro de 2013 e novembro 2014, período em que se puderam avaliar os resultados da Fase 2 do projeto, viu-se queda significativa do consumo de energia, mesmo num mês de forte calor e alta demanda de água tratada. Somente neste mês de avaliação, obteve-se uma economia de 1.141kWh, totalizando uma economia de R\$285,25.

CONCLUSÕES

O rearranjo hidráulico, passando pela mudança na forma de alimentação das bombas, representou uma significativa melhoria operacional, visto o aumento da pressão de sucção e a diminuição drástica de partidas das motobombas.

Os reservatórios foram anulados no projeto, pois apresentavam problemas estruturais, falta de capacidade e autonomia, além de controles ineficientes de nível de água. Modificando-se o modo de operação das bombas para um sistema de pressurização da rede de distribuição tipo *booster*, obteve-se uma melhoria na qualidade de distribuição de água.

A automação do bombeamento foi extremamente importante para o controle operacional e para a redução do consumo energético. Antes o bombeamento era acionado de forma manual e operava a uma frequência de 60Hz, ou seja, as bombas operavam em sua capacidade máxima, por curtos períodos de tempo, o que tornava a operação intermitente. Após a incorporação do controle eletrônico, o bombeamento passou a consumir exatamente a energia necessária para atender a necessidade da região. Além disso, foi inserido o bombeamento no controle operacional remoto, o que permitiu a transmissão dos dados via rádio para uma base de monitoramento na sede da empresa. Agora, podem-se alterar diversas variáveis operacionais sem a necessidade de deslocamentos ao local. Ao mesmo tempo, facilitam-se os diagnósticos de falhas.

A substituição de um conjunto motobomba de maior rendimento hidráulico e elétrico propiciou uma economia energética relevante, melhorando os resultados globais do projeto. Tanto o objetivo geral, quanto o específico foram atendidos, pois foram executadas diversas ações que induziram a uma maior eficiência energética no bombeamento em questão. Além disso, os indicadores financeiros, tanto VPL como *Payback* Simples, indicaram um projeto sustentável e viável economicamente, podendo ser aplicado em outros bombeamentos.

Futuramente, também será realizado o estudo para a utilização de motores de alto rendimento Premium, com rendimentos superiores a 95% nestes possíveis bombeamentos. Serão calculados diversos indicadores para verificar se o incremento de tecnologia é acompanhado por um maior retorno energético que compense esse investimento extra.

REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Cuidando das águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília: ANA, 2011.
- GONÇALVES, Ricardo Franci. Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- MONTEIRO, Marco Aurélio; ROCHA, Leonardo Resende Rivetti. Gestão Energética. Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- SANTOS, Afonso Henriques Moreira. Eficiência Energética, Teoria & Prática. Eletrobrás, Procel Educação, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Itajubá, 2007.

CAPÍTULO 5

Segundo colocado na Categoria "Graduação e Especialização" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE LEMNAS: EFEITO DO PRÉ- TRATAMENTO

Bruna Scandolara Magnus^{1}*

Wanderli Leite²

Gustavo Tonon³

Rodrigo de Almeida Mohedano⁴

Rejane Helena Ribeiro da Costa⁵

Paulo Belli Filho⁶

¹ *Mestranda em Engenharia Ambiental – UFSC*

² *Doutor em Engenharia Ambiental, Professor Adjunto A – UFPE*

³ *Mestrando em Engenharia Ambiental – UFSC*

⁴ *Doutor em Engenharia Ambiental, Professor visitante – UFSC*

⁵ *Doutora em tratamento de Água, Professora titular – UFSC*

⁶ *Doutor em Química Industrial e Ambiental, Professor titular – UFSC*

* bruna.magnus@posgrad.ufsc.br

RESUMO

O uso de macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes vem crescendo em diversos países. No entanto, as experiências brasileiras ainda são escassas. Essas plantas apresentam predisposição para a remoção de nutrientes presentes no esgoto sanitário e alta taxa de crescimento, o que gera por consequência biomassa excedente passível de valorização energética. Neste sentido, este estudo avaliou o potencial

de geração de biometano (BMP) da biomassa de lemnas (*Landoltia punctata*) em excesso produzida em um sistema de tratamento de esgoto sanitário, verificando ainda o efeito do processo de pré-tratamento térmico, alcalino e fermentativo sobre a produtividade desse gás. Desta forma, realizou-se um experimento em batelada, em escala laboratorial para avaliar o BMP, utilizando-se como substrato a biomassa de lemnas em excesso no tratamento de esgoto sanitário de um sistema piloto de lagoas de lemnas. Para o ensaio BMP, os substratos pré-tratados foram incubados em reatores de 500 mL (400 mL de volume útil) juntamente com inóculo, em um banho termostático a 35°C. Os reatores operaram com tempo de detenção hidráulica de 25 dias e com agitação controlada.

Observou-se que a maior produção específica de biogás (SGP) e a produção específica de metano (SMP) foram obtidas a partir do substrato que passou por processo de pré-tratamento fermentativo ($0,39 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgSV}^{-1}_{\text{ADICIONADO}}$ e $0,23 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgSV}^{-1}_{\text{ADICIONADO}}$, respectivamente). Tal resultado, relacionado com a constante de hidrólise (Kh) obtida para este pré-tratamento, $0,137 \text{ dia}^{-1}$ — o que representa um período de biodegradação completa de 8 dias — atestou que o pré-tratamento fermentativo foi o processo que apresentou maior desempenho na produção de biometano. O estudo mostrou-se de grande importância para avaliar o potencial de geração de biometano a partir da biomassa de lemna residual do tratamento de esgoto sanitário, representando uma alternativa sustentável que integra o tratamento de águas residuárias e o gerenciamento dos subprodutos originado neste processo.

Palavras-Chave: lemnas, digestão anaeróbia, pré-tratamento, biometano.

INTRODUÇÃO

Os efeitos da utilização de combustíveis fósseis, como as alterações climáticas e a escassez de fontes de energia têm chamado a atenção da sociedade em conferências sobre o aquecimento global e mudanças climáticas desde a década de 1960, tais como: Reunião do Clube de Roma, 1968; Conferência de Estocolmo 1972, IPCC, 1990; Rio 92, 1992; Protocolo de Quioto, 1997; Rio +10, 2002; Rio +20, 2012; COP 21, 2015. Desde a publicação do protocolo de Quioto, que propõe um tratado internacional para controle da emissão dos gases de efeito estufa, a energia renovável tem desempenhado um papel crucial no âmbito do desenvolvimento sustentável (WU *et al.*, 2014).

Atualmente, o tratamento de esgoto sanitário tem sido realizado com base em tecnologias convencionais (lodos ativados, lagoas de estabilização, reatores UASB) otimizadas para aumentar as eficiências de degradação da matéria orgânica, assim

como a remoção de nutrientes. Neste contexto, as lagoas de estabilização com macrófitas aquáticas, especificamente aquelas da subfamília *Lemnoideae*, apresentam-se como alternativa de tecnologia sustentável que reúnem, além das vantagens supracitadas, a possibilidade de se aproveitar a biomassa excedente produzida nos sistemas de tratamento de águas residuárias, para a geração de subprodutos de alto valor econômico e energético (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011).

A aplicação de tecnologias sustentáveis que integram o tratamento de águas residuárias e o aproveitamento energético de subprodutos gerados neste processo é bastante difundida pela comunidade científica. Neste sentido, a presente pesquisa avaliou o potencial de geração de biometano da biomassa de lemnas (*Landoltia punctata*) em excesso no tratamento de esgoto sanitário, assim como o efeito do pré-tratamento do substrato na produção desse gás.

METODOLOGIA

Foi realizado um experimento no intuito de avaliar a produção de metano em reatores em batelada, em escala laboratorial, a partir da biomassa de lemna excedente do tratamento de esgoto sanitário real. Este resíduo foi produzido em um sistema de lagoas de lemnas em escala piloto, composto por um tanque de equalização com um TDH de 25 dias e duas lagoas de lemnas da espécie *Landoltia punctata*, operando com uma vazão de esgoto sanitário de 200 L.d⁻¹, o que confere um TDH de aproximadamente 17 dias em cada lagoa de lemnas.

O ensaio BMP ocorreu com inoculação de lodo anaeróbio oriundo de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), localizada em Florianópolis, SC. A fim de evitar produção de metano devido à presença de material orgânico endógeno, este foi previamente desgaseificado através de incubação à temperatura de 35°C por um período de 20 dias (AQUINO *et al.*, 2007).

O ensaio BMP foi realizado utilizando-se um conjunto de 12 frascos com volume útil de 400 mL, agitação intermitente e temperatura controlada em banho termostático (35°C). Os reatores foram divididos em trélicas cujos meios reacionais foram compostos por uma razão inóculo/substrato (I.S⁻¹) determinada com base na concentração de sólidos voláteis (SV) (Tabela 1).

O teste em batelada para avaliar o BMP foi realizado utilizando um medidor on-line de baixo fluxo de biometano com alta precisão denominado Teste Automático de Potencial de Metano II (*Automatic Methane Potential Teste System II AMPTS II*) (Figura 1).

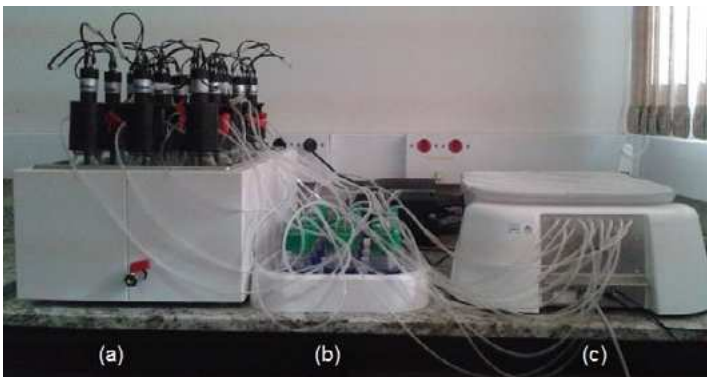
Tabela 1 – Configurações de operação dos reatores.

Configurações dos reatores	Reatores			
	Sem pré-tratamento	Pré-tratamento térmico	Pré-tratamento fermentativo	Pré-tratamento alcalino
Quantidade total de amostra (g)	400	400	400	400
Massa de inóculo (g)	377	398	376	377
Massa de substrato (g) ⁽¹⁾	23	2 ⁽²⁾	24	23
SV _{inóculo} (gSV.d ⁻¹)	2,2	2,3	2,2	2,2
SV _{substrato} (gSV.d ⁻¹)	1,6	1,6	0,9	1,6
Razão I/S	1,4	1,4	2,5	1,4
COV (gSV.L _{REATOR} ⁻¹ .d ⁻¹)	4,0	4,0	0,4	4,0

Nota: (1) gramas de massa fresca; (2) gramas de massa seca equivalentes a 23g úmido.

Fonte: O autor, 2015.

Figura 1 – Sistema experimental usado para realizar o teste do potencial de produção de biometano da lemna. A: banho termostático; B: unidade de fixação de CO₂; C: dispositivo de medição de volume de CH₄.



Fonte: O autor (2015).

No presente trabalho, foram aplicados três diferentes pré-tratamentos à *Landoltia punctata*, a fim de verificar qual é o processo que favorece maior produção de biometano. Segundo Hendriks e Zeeman (2009), as técnicas de pré-tratamento visam aumentar a digestibilidade do substrato para favorecer as produções específicas obtidas pelo processo anaeróbio.

No pré-tratamento térmico, as lemnáceas passaram por um processo de trituração mecânica e posteriormente foram secas em estufa à temperatura de 35°C, por

24 horas, a fim de simular um leito de secagem natural. Para realizar o pré-tratamento fermentativo, a lemnas também foi triturada e passou por um processo de fermentação com objetivo de maximizar as reações das bactérias hidrolíticas e acidogênicas, favorecendo a degradabilidade da biomassa e, posteriormente, sua conversão a biometano em um reator metanogênico (HENDRIKS & ZEEMAN, 2009). Já no terceiro tratamento aplicado, pré-tratamento alcalino, ocorrem reações de solvatação e saponificação, as quais provocam a deslignificação e o inchamento da biomassa, tornando-a mais acessível para as bactérias (HENDRIKS & ZEEMAN, 2009; PARK & KIM, 2012). Neste sentido, uma solução alcalina (NaOH 1%) foi utilizada para testar o pré-tratamento da *Landoltia punctata* previamente ao teste BMP.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Produção de metano a partir da digestão anaeróbia do substrato

O processamento dos dados coletados durante o TDH operacional (25 dias) do teste BMP permitiram a construção de curvas médias de volume acumulado de biogás e metano assim como a determinação das produções específicas das constantes de hidrólise (K_p) para cada substrato/pré-tratamento.

O volume acumulado de biogás e gás metano durante a digestão anaeróbia das lemnas, sem pré-tratamento e com pré-tratamento, são observados nas Figuras 2 e 3. As produções finais de biogás e metano foram maiores para os reatores com pré-tratamento alcalino (513 NmL de biogás e 308 NmL de CH_4), seguido do pré-tratamento térmico (507 NmL de biogás e 304 NmL de CH_4). As menores produções de biogás e de CH_4 foram obtidas nos reatores sem pré-tratamento (408 NmL de biogás e 245 NmL de CH_4) e com pré-tratamento fermentativo (336 NmL de biogás e 202 NmL CH_4). No entanto, a curva apresentada para as produções de biogás e metano do reator com pré-tratamento fermentativo não considera os rendimentos de biogás obtidos na etapa de fermentação (390 NmL de biogás e 232 NmL de CH_4), previamente à fase metanogênica (Figura 4).

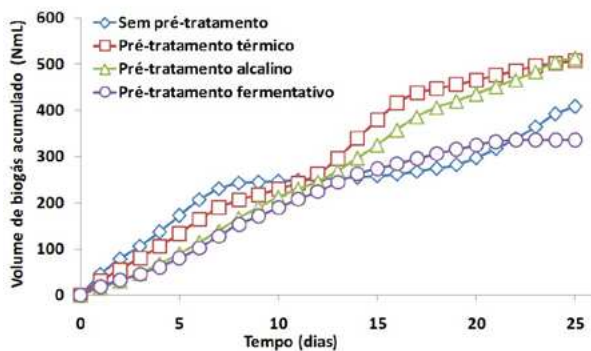
Observa-se pelas Figuras 2 e 3 que as produções de biogás e metano apresentaram um comportamento diferente do padrão na metade do período experimental, especialmente para os reatores com lemnas sem pré-tratamento. Os reatores apresentaram cenário de cessão de produção de biogás por volta do 12.º dia operacional. Posteriormente, observou-se um novo aumento nas curvas de produção de gás, que atingiram novas assíntotas horizontais após 25 dias operacionais.

A biomassa não tratada manifestou um padrão de degradação díáuxico, no qual duas fases exponenciais de produção de gases foram observadas: uma fase rápida durante os primeiros 12 dias e uma fase lenta após o 20.º dia de experimentação (Figura 2). Este comportamento é geralmente observado com substratos que possuem uma fração de

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO A PARTIR DE LEMNAS...

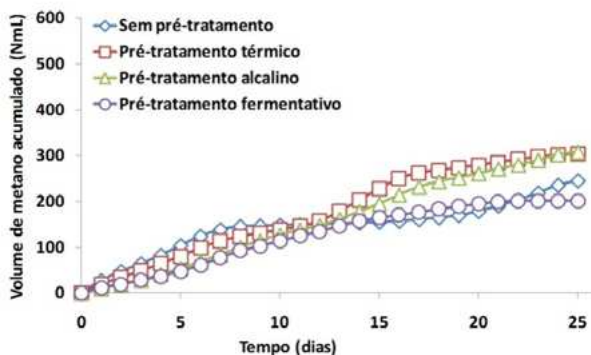
moléculas facilmente degradável, que exigem pouca hidrólise, bem como com uma fração de moléculas de difícil degradação, que exigem um período prolongado de hidrólise (HAMILTON *et al.*, 2005).

Figura 2 – Produção de biogás da biomassa residual de lemna sem pré-tratamento e com pré-tratamento.



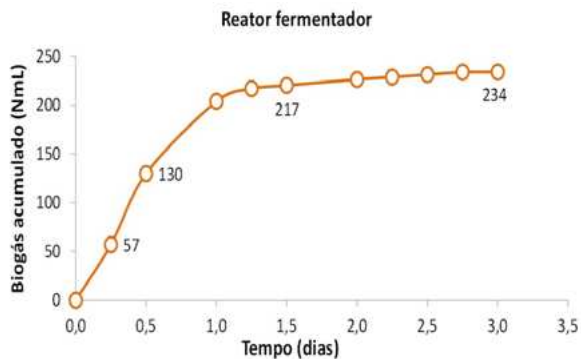
Fonte: O autor (2015).

Figura 3 – Produção de metano da biomassa residual de lemna sempre-tratamento e com pré-tratamento.



Fonte: O autor (2015).

Figura 4 – Produção de biogás da biomassa residual de lemna no reator fermentativo.



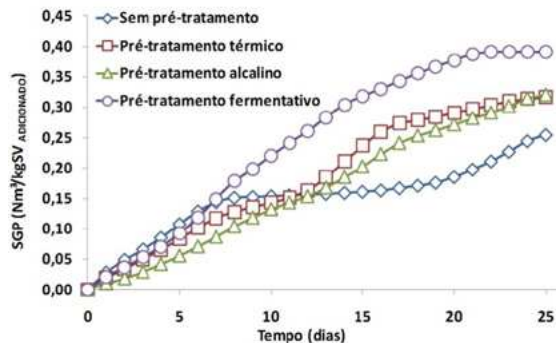
Fonte: O autor (2015).

Determinação das produções específicas de biogás e de metano

A produção específica de biogás e de metano foram determinadas a fim de se avaliar a melhor combinação tecnológica, em relação aos pré-tratamentos, que permita obter o maior reaproveitamento energético da lemna – subproduto do processo de tratamento de águas residuárias.

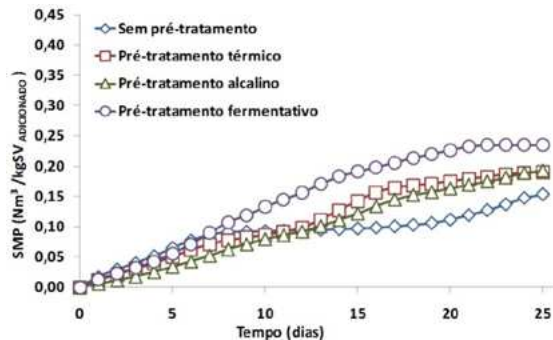
As produções específicas de biogás e metano variaram entre 0,25 – 0,39 Nm^3 . kgSV^{-1} ADICIONADO e entre 0,15-0,23 Nm^3 . kgSV^{-1} ADICIONADO respectivamente (Figura 5 e 6). Analisando-se as Figuras 5 e 6, observa-se que o pré-tratamento que apresentou melhor eficiência na potencialização da produção de biogás e metano da *Landoltia punctata* foi o fermentativo (0,39 Nm^3 . kgSV^{-1} ADICIONADO e 0,23 Nm^3 . kgSV^{-1} ADICIONADO, respectivamente). Tais valores da produção de metano foram inferiores àqueles obtidos por outras pesquisas, como Kesaano (2011), o qual encontrou um SMP de 0,36 Nm^3 . kgSV^{-1} , em digestão anaeróbia de biomassa residual de lemna em temperatura mesofílica, aplicando uma carga diariamente que variou de 0,25 - 1,75 g de massa seca de lemna por dia, por um período de 1 ano. Cu *et al.* (2015) também encontraram um SMP de 0,34 Nm^3 . kgSV^{-1} , em um teste BMP de lemnas a uma temperatura 37°C.

Figura 5 – Produção específica de biogás da biomassa de lemna sem pré-tratamento e com pré-tratamento.



Fonte: O autor (2015).

Figura 6 – Produção específica de metano da biomassa de lemna sem pré-tratamento e com pré-tratamento.



Fonte: O autor (2015).

Os valores de SGP e SMP encontrados para lemnas neste estudo estão correlacionados com as respectivas constantes de hidrólise na Tabela 2. Segundo Vavilin (2008), quanto maior o valor da constante de hidrólise, maior a biodegradabilidade do substrato. Desta forma, observa-se que o maior valor da constante de hidrólise encontrada foi para a biomassa de lemna residual que passou pelo processo de pré-tratamento fermentativo, seguido do pré-tratamento térmico e alcalino (Tabela 2).

Tabela 2 – Produções específicas de biogás, metano e constante de hidrólise para biomassa residual de lemna sem pré-tratamento e com pré-tratamento.

Reatores	SGP Nm ³ .kgSV ⁻¹	SMP Nm ³ .kgSV ⁻¹	K _h Dia ⁻¹	1/K _h Dia
Sem pré-tratamento	0,25	0,15	0,027 (0,758) ⁽¹⁾	37
Pré-tratamento térmico	0,32	0,19	0,076 (0,898)	13
Pré-tratamento alcalino	0,32	0,19	0,072 (0,991)	14
Pré-tratamento fermentativo	0,39	0,23	0,137 (0,985)	8

Nota: (1) Valores em parênteses são os coeficientes de correlação (R²). Fonte: O autor, 2015.

Embora as produções específicas de biogás e as constantes de hidrólise tenham apresentado valores maiores para os substratos que passaram por pré-tratamento, devem-se levar em consideração os custos envolvidos em cada processo. O pré-tratamento fermentativo apresentou maior SGP e K_h em relação ao substrato sem pré-tratamento, porém para atingir essa produção mais elevada é necessário um investimento inicial para se obter, por exemplo, uma estrutura de reatores anaeróbios de dois estágios para viabilizar a separação da fase fermentativa da fase metanogênica. Por sua vez, o processo térmico apresenta-se com uma alternativa que requer pouco investimento, visto que este pré-tratamento foi aplicado a fim de simular uma secagem térmica natural, a 35°C, da biomassa excedente.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi avaliado o potencial de geração de biometano de lemna proveniente do tratamento de esgoto, utilizando-se reatores anaeróbios em escala laboratorial. O efeito do pré-tratamento térmico, alcalino e fermentativo foram também avaliados nos ensaios. O ensaio BMP com lemna não pré-tratada resultou na menor produção específica de biogás (0,25 Nm³.kgSV⁻¹_{ADICIONADO}). O pré-tratamento fermentativo favoreceu a conversão do substrato a biogás e resultou no maior valor de SGP obtido (0,39 Nm³.kgSV⁻¹_{ADICIONADO}), enquanto que os tratamentos térmico e alcalino resultaram em menor produção de gás (0,32 Nm³.kgSV⁻¹_{ADICIONADO}).

A maior produção específica de biogás foi obtida com a lemna que passou por pré-tratamento fermentativo ($0,39 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgSV}^{-1}_{\text{ADICIONADO}}$), seguido dos pré-tratamentos térmico e alcalino, que atingiram $0,32 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kgSV}^{-1}_{\text{ADICIONADO}}$.

O substrato submetido ao pré-tratamento fermentativo apresentou o maior valor da constante de hidrólise ($0,137 \text{ dia}^{-1}$) e conseqüentemente menor tempo de biodegradação (8 dias). Os valores de K_h para os substratos pré-tratados em processo térmico e em alcalino foram, respectivamente, $0,076$ e $0,072 \text{ dia}^{-1}$. A digestão anaeróbia de lemna sem pré-tratamento foi o processo que apresentou menor valor de K_h ($0,027 \text{ dia}^{-1}$) e maior período de biodegradação (37 dias).

Neste sentido, conclui-se que o processo de pré-tratamento aplicado a biomassa residual de lemnas influenciou de maneira positiva na produção de biometano, favorecendo a etapa limitante da digestão anaeróbia (hidrólise). O pré-tratamento que apresentou melhor resultado na produtividade de biometano foi o fermentativo, seguido do térmico e do alcalino.

Este trabalho ressalta que o uso da tecnologia anaeróbia agrega valor à biomassa de lemnas em excesso no tratamento de esgoto sanitário. Os resultados acerca dos pré-tratamentos apontaram a maximização da produção de biometano a partir deste resíduo.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, Sérgio *et al.*, Metodologias para determinação de Atividades Metanogênicas Específica (AME) em Lodos Anaeróbios. Revista Engenharia Sanitária Ambiental. v. 12, n. 2, p. 192-201, 2007.
- CU, Thu. *et al.* Biogas production from vietnamese animal manure, plant residues and organic waste: influence of biomass composition on methane yield. Asian Australasian J. Anim. Sci., v. 28, n. 2, 2015.
- HAMILTON, Ryan. *et al.* Structured model for denitrifier diauxic growth. Biotechnology and Bioengineering, v. 90, n. 4, 2005.
- HENDRIKS, Alexander; ZEEMAN, Grietje. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, n. 100, p. 10–18, 2009.
- KESAANO, Maureen. Sustainable management of duckweed biomass grown for nutrient control in municipal wastewaters. Dissertation (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) Utah State University, 2011.
- PARK, Yong; KIM, Jun. Comparison of various alkaline pretreatment methods of lignocellulosic biomass. Energy, n. 47 p. 31–35, 2012.
- PITTMAN, Jon; DEAN, Andrew; OSUNDEKO, Olumayowa. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. Bioresource Technology, n. 102, p. 17–25, 2011.
- VAVILIN, Vasily *et al.* Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. Waste Management, n. 28, p. 939–951, 2008.
- WU, Xiaofan *et al.* Ecological accounting for an integrated “pig–biogas–fish” system based on emergent indicators. Ecological Indicators, v. 47, p. 189-197, 2014.

CAPÍTULO 6

Terceiro colocado na Categoria "Graduação e Especialização" do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis

DIMENSIONAMENTO DE UM BIODIGESTOR: APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS URBANOS PARA A GERAÇÃO DE BIOGÁS

Kelly Borne^{1*}
*Andréia Cristina Furtado*²
*Oswaldo Hideo Ando Junior*³
*Jhony Rodrigo da Silva*⁴
*Jiam Pires Frigo*⁵
*Fabiano Pavoni Nogueira*⁶

¹ *Graduanda em Engenharia Química – UNILA*

² *Doutora em Engenharia Química, Professora Adjunta – UNILA*

³ *Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor Adjunto – UNILA*

⁴ *Graduado em Física – IFSP*

⁵ *Doutor em Engenharia Agrícola, Professor – UNILA*

⁶ *Graduado em Turismo – PUC-RS*

* kelly.borne@aluno.unila.edu.br

RESUMO

Os resíduos provenientes de esgotos e lixo urbano necessitam de tratamento antes de serem descartados no ambiente para evitar a contaminação de solos, dos recursos hídricos e ainda a disseminação de doenças. Além do mau cheiro e de serem fortes contaminantes, tais resíduos impactam na promoção do aquecimento global devido à geração principalmente de metano durante o processo de tratamento e decomposição. Por outro lado, a elevada concentração do metano na composição desse biogás favorece a geração de energia, quer seja automotiva, elétrica ou térmica.

O objetivo deste trabalho é avaliar, por meio de um estudo de caso, a implantação de um biodigestor para tratamento de resíduos em um condomínio residencial com aproveitamento de biogás.

Palavras-Chave: biogás, resíduo sólido, biodigestor, esgoto, metano.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o crescimento populacional no Brasil foi vertiginoso. Entre 2000 e 2012, o número de residências alcançou um total de 62,8 milhões, segundo o IBGE (2012). No entanto, apenas 64,3% desse total possuía tratamento de esgoto.

Ainda de acordo com esses dados do IBGE, do total de residências, cerca de um milhão se encontram em vilas ou em condomínios residenciais.

Os impactos ambientais desse crescimento desordenado são cada vez mais evidentes. A consequente reconfiguração da cidade, aliada à dispersão urbana inédita e o êxodo rural, intensificou o quadro problemático dos serviços públicos essenciais, como a coleta de lixo e o tratamento de resíduos sanitários.

O atraso na definição de leis que tratam especificamente do saneamento básico acarretou a letargia na implantação dos sistemas de tratamento de esgotos urbanos e coleta de resíduos. Apenas em 2007, com a instituição de diretrizes nacionais para o saneamento básico por meio da lei n.º 11.445 (BRASIL, 2007), e em 2010, com a instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei n.º 12.305 (BRASIL, 2010), estabeleceram-se padrões nacionais visando um tratamento mais eficaz dos resíduos.

Com isso, cresceram as estações de tratamento de efluentes em indústrias e em condomínios, além de iniciativas de coleta e destinação específicas para os resíduos sólidos. Retirando a exclusiva responsabilidade do setor público em buscar soluções para os impactos ambientais decorrentes da falta de saneamento básico, a legislação trouxe para os grandes produtores de resíduos – os condomínios, por exemplo – a necessidade de realizar o descarte de efluentes em locais específicos, de reduzido risco à natureza, e com padrões mínimos de tratamento prévio à destinação.

Entretanto, muitos condomínios ainda utilizam sistemas arcaicos de tratamento, como a fossa séptica, onde os resíduos se depositam em um poço, cuja parte líquida acaba absorvida pelo solo, retirando-se mecanicamente apenas parte da porção sólida. Além do governo federal, estados e municípios buscam, cada vez mais, implantar leis que estabeleçam alternativas viáveis e adequadas às respectivas realidades de desenvolvimento social e econômico. No Paraná, por exemplo, de acordo com a lei estadual n.º 12.493, aprovada com o decreto n.º 6.674, foi extinta a prática das licenças ambientais de longa duração e sem inspeção periódica. Atualmente, as propriedades estão sujeitas a periódicos trabalhos de fiscalização das atividades no que diz respeito ao tratamento dos resíduos ali produzidos.

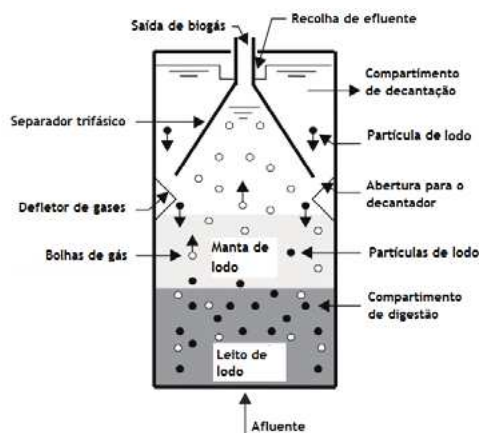
Nesse contexto, o principal objetivo desse trabalho foi analisar a implementação de um biodigestor de fluxo ascendente, em um condomínio residencial na cidade de Foz do Iguaçu – PR, verificando sua viabilidade em reduzir os impactos ambientais provocados pela eliminação de tais resíduos e promover o aproveitamento do biogás térmica ou eletricamente.

Os processos de fermentação anaeróbia que produzem metano sempre foram utilizados pelo homem para o tratamento de esgoto (fossas sépticas), que serviu tanto para o tratamento de esgotos domésticos em pequenas comunidades, como resíduos da indústria alimentar ou da agricultura. Com o passar dos anos, esses sistemas simplificados de tratamento têm evoluído e passaram a ser conhecidos como digestores, sendo utilizados para efeito de estabilização das lamas resultantes da sedimentação primária e tratamento biológico aeróbico de águas residuais (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Os modelos de biodigestor em uso atualmente têm sua especificidade em função do uso, seja para produção de biofertilizante, para tratamento de efluentes ou resíduos sólidos, ou mesmo para produção de energia. O reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA ou RALF), também conhecido como reator anaeróbico de manta de lodo, é o modelo geralmente utilizado para tratamento de elevadas concentrações de biomassa. Assim, o volume requerido é bastante reduzido se comparado com outros sistemas de tratamento de esgoto.

O reator anaeróbico de fluxo ascendente mostrado esquematicamente na Figura 1 consiste basicamente de um tanque composto por uma área de digestão na parte inferior e uma área de decantação na parte superior, precedido por um sistema para a separação do gás gerado. O resíduo líquido a ser tratado é uniformemente distribuído na parte inferior no reator, que depois permeia uma camada de lodo, que converte a matéria orgânica em biogás (LETTINGA *et al.*, 1980; NOGUEIRA, 1986).

Figura 1 – Esquema do biodigestor modelo RAFA.



Fonte: LETTINGA *et al.*, 1980.

A estrutura do RAFA é organizada a fim de possibilitar a separação e o acúmulo do gás, seguido da separação e do retorno da biomassa, dificultando, portanto, a saída do gás com o efluente; exceção feita para o remanescente de gás diluído no meio líquido, em geral, entre 30 e 50% do volume gerado (CHERNICHARO, 2007). O gás utilizado para a produção de energia é então coletado na parte superior do reator, cuja estrutura cônica ou piramidal permite a sedimentação dos sólidos (VON SPERLING, 1996). Como resultado, a concentração de biomassa no reator mantém-se elevada e o efluente sai clarificado. O lodo produzido no processo anaeróbio sai estabilizado, e em quantidade reduzida, podendo ser desidratado posteriormente em leitos de secagem ou equipamentos especialmente desenhados para este fim, como prensas e centrífugas.

Diversas são as instalações cujo uso do RAFA para tratamento de efluentes orgânicos facilita a operação de um compacto sistema de tratamento. Aliado a essa facilidade, o baixo custo torna este modelo como uma boa alternativa para condomínios residenciais, dispensando, inclusive, a necessidade de mão de obra especializada, podendo ser operado por funcionários do próprio condomínio. No entanto, é fundamental que seja realizado um adequado tratamento dos gases odoríferos gerados no processo de tratamento, que se configura em um dos principais problemas dos sistemas anaeróbios.

A produção de energia a partir de resíduos orgânicos domiciliares é baseada no esgoto (águas residuárias) e no lixo das residências. No primeiro caso, a produção se baseia no volume da descarga de um vaso sanitário. As águas residuais são compostas de aproximadamente 99,9% de água, e o restante (0,1%) uma mescla de sólidos orgânicos, inorgânicos e microrganismos (JORDÃO & PESSOA, 1995). Assim, há a necessidade do acoplamento de um sistema de descarga que diminui o volume de água dispensado.

No sistema baseado em lixo residencial, os resíduos orgânicos, formados por restos de plantas, cascas de frutas e verduras, alimentos em decomposição, são separados dos resíduos inorgânicos (papel, plástico, entre outros) por meio da implementação de coleta seletiva do lixo. Um aspecto importante para o bom funcionamento deste sistema é conscientização dos moradores e seu compromisso em separar os resíduos produzidos corretamente na origem de geração.

METODOLOGIA

Estimativa da quantidade de biogás produzido

A estimativa da quantidade de esgoto disponível para tratamento no biodigestor foi realizada a partir da seleção do condomínio monitorado para a verificação da viabilidade de implantação do biodigestor.

O condomínio residencial vertical avaliado está localizado na cidade de Foz do Iguaçu, região Oeste do Paraná. O prédio tem 20 andares, com 8 apartamentos por andar, totalizando 160 apartamentos.

Na época do estudo (setembro de 2015), um levantamento realizado junto à administração do edifício identificou um total de 720 habitantes.

A produção total do biogás para este condomínio residencial foi estimada tomando os valores de resíduos orgânicos e esgoto. Para essa população, a estimativa de esgoto gerado diariamente, por apartamento, foi de 0,64 m³. Para estimar a quantidade de esgoto produzido, foi utilizado o valor de referência adotado pelas concessionárias de água e esgoto do Brasil, que consiste em um total diário de 0,18 m³ de esgoto produzido por habitante. Para a determinação da quantidade de biogás produzido a partir desse volume, foi utilizado o fator de conversão proposto por COELHO *et al.* (2006), no qual são gerados 0,07361 m³ de biogás para cada m³ de esgoto tratado.

Além do resíduo proveniente de esgoto, foram considerados no estudo os resíduos sólidos (lixo orgânico) gerados pelos moradores. Em média, uma pessoa adulta produz o equivalente a 600 g de lixo por dia, correspondendo, em uma cidade com 20 mil habitantes, à produção de cerca de 12 mil kg.dia⁻¹ (MARA, 2003). Em cidades de pequeno porte, estima-se que a quantidade de lixo domiciliar produzida diariamente, por habitante, esteja entre 400 g e 600 g, e que nos grandes centros esta quantidade possa chegar a 1,5 kg.hab⁻¹.dia⁻¹ (ALVES & LUCON, 2001).

Dimensionamento do biodigestor

O dimensionamento do biodigestor (Equação 1) foi realizado com base nos cálculos propostos por CHERNICHARO (2007).

$$V=Q*HRT \quad (1)$$

em que:

HRT [d] – tempo de retenção hidráulica da biomassa no digestor;

Q [m³/d⁻¹] – vazão volumétrica de substrato;

V [m³] – volume.

O volume total do biodigestor de fluxo ascendente é determinado a partir do volume calculado pela equação 1, somado ao volume de biogás produzido a partir da biomassa empregada. A área de cada módulo e a largura do reator e do módulo do biogás são obtidas pelas equações 2, 3 e 4, respectivamente.

$$A_{\text{reator}} = \frac{V}{H} \quad (2)$$

$$L_1 = \sqrt{A_{\text{reator}}} \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{A_{\text{biogás}}}{L_1} \quad (4)$$

em que:

A_{reator} [m²] – área do reator;

H [m] – altura do reator;

L_1 [m] – largura do reator;

L_2 [m] – comprimento do módulo do biogás;

$A_{\text{biogás}}$ [m²] – área do módulo de biogás.

A partir do dimensionamento do reator, é possível definir a carga hidráulica volumétrica (VHC) do biodigestor (equação 5).

$$VHC = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

em que:

VHC [m³.m⁻³.d⁻¹] – carga hidráulica volumétrica do biodigestor;

Q [m³.d⁻¹] – vazão volumétrica de substrato;

V [m³] – volume.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados referentes à geração de esgoto e disposição de resíduos orgânicos do condomínio residencial (Tabela 1), foi possível quantificar a produção diária de biogás no condomínio, como também a necessidade diária de biogás para a geração de energia, levando-se em conta o total de habitantes.

Tabela 1 – Dados de geração e consumo de biogás produzido – setembro/2015.

Item	Dados do condomínio residencial	Produção de biogás (m ³ .d ⁻¹)
Moradores	720	-
Esgoto	129,6m ³	9,5
Lixo orgânico	76,93kg	5,8
Consumo de gás	0,33m ³ .hab ⁻¹ .d ⁻¹	237,6
m ³ de biogás	0,40kg de GLP	-

A partir da Tabela 1, o valor de produção de biogás para consumo é de cerca de 15,3 m³.d⁻¹, com um consumo total médio de cerca de 237,6 m³.d⁻¹ no condomínio.

A quantidade de biogás produzido no processo de digestão dos resíduos sólidos orgânicos e esgoto é pequena em relação à necessidade diária (consumo de gás) requerida para o uso energético dos habitantes do condomínio. No entanto, a implementação do biodigestor, além de complementar a geração de energia, assegura a produção da energia a partir de uma fonte de energia renovável e muito menos poluente.

O uso do biogás gerado pelo processo de digestão anaeróbia de esgotos e resíduos orgânicos irá contribuir diretamente para o tratamento dos resíduos sólidos, além da utilização do gás na geração de energia.

Mesmo sendo uma pequena produção de biogás se comparada ao consumo, de acordo com os valores atuais de gás natural segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e utilizando a conversão para 1 m³ de biogás em relação ao gás GLP (Tabela 1), a economia gerada pela produção é de R\$ 900,00 por mês em média, ou R\$ 10.800,00 por ano. Considerando a produção diária de biogás a partir dos resíduos gerados pelos moradores do condomínio, as dimensões do biodigestor foram calculadas a partir das equações de 1 a 4. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões do biodigestor para a geração de biogás a partir de esgoto e resíduos orgânicos domésticos do condomínio.

A _{reator} (m ²)	26,6
A _{biogás} (m ²)	3,8
L ₁ (m)	5,2
L ₂ (m)	0,8
V (m ³)	118
VHC (m ³ .m ⁻³ .d ⁻¹)	1,3

Além da produção de energia, a instalação do biodigestor trará o benefício da estabilização do esgoto gerado, garantido a minimização da carga poluente do esgoto.

Este tratamento, somado às vantagens socioambientais, também reduz amplamente o risco de multas por descarte irregular do esgoto em corpos hídricos. No Paraná, por exemplo, uma multa pelo despejo indevido do esgoto pode chegar a R\$ 80 mil reais, obviamente depende de uma série de fatores intervenientes.

CONCLUSÕES

O projeto de implantação do biodigestor é teoricamente viável, apesar de não existirem experiências práticas reconhecidas de seu uso para o tratamento de resíduos sólidos. Os equipamentos e materiais necessários para a montagem do sistema estão disponíveis no mercado e a tecnologia envolvida no biodigestor RAFA é relativamente simples e de baixo custo, além de baixa complexidade operacional.

Segundo estudo realizado por JORDAN *et al.* (2004), inicialmente é necessário um investimento de R\$ 20.000,00 em um biodigestor com capacidade para produzir $150 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ e o tempo de retorno é de aproximadamente 15 meses. Utilizando como base a economia que o condomínio terá em relação ao gás GLP, o tempo de retorno será de aproximadamente 22 meses.

Outro estudo realizado por ESPERANCINI (2007), utilizando um biodigestor indiano com capacidade para produzir cerca de $43 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, mostra que o custo total para sua implementação é cerca de R\$ 8.175,00. Comparativamente, o custo do biodigestor calculado para o condomínio seria superior, sendo necessário levar em conta que o dimensionamento deste biodigestor foi realizado para produzir 3 vezes mais do que a capacidade do biodigestor proposto no trabalho de ESPERANCINI (2007), tendo um custo de R\$ 24.575,00 para a sua construção e tempo de retorno de aproximadamente 27 meses.

O projeto de autogeração de energia elétrica e térmica a partir do biogás proveniente de esgotos em um condomínio residencial traz benefícios ambientais, como a diminuição do lançamento de gases potencialmente causadores de efeito estufa e redução do lançamento de esgotos na natureza.

A utilização do biogás gera economias na propriedade, uma vez que é possível gerar energia térmica e/ou elétrica, ou ainda entrar no processo de geração distribuída – que é a interligação junto ao sistema elétrico da concessionária para venda de energia, esta última de acordo com a legislação vigente da concessionária de energia local.

Os biodigestores são excelentes meios de tratamentos de resíduos e esgoto independentes e podem ser expandidos até mesmo para comunidades desprovidas de saneamento básico.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Síntese dos preços praticados. Sistema de levantamento de preços (CSA): 2016.
- ALVES, J. W.; LUCON, O. S. Geração de energia elétrica com gás de lixo. *Ambiente Técnico*, CETESB/ASEC, v.1, n.2, pp.1-3, 2001.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, v.6. cap. 5, p. 159-259. 2001. 484 p.
- BRASIL. Lei Federal 11.445 – Estabelece as normas nacionais para o saneamento básico. Presidência da República: 05 de janeiro de 2007.
- BRASIL. Lei Federal 12.305 – Institui a política nacional de resíduos sólidos. Presidência da República: 02 de agosto de 2010.
- CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbicos. 2.^a edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2007.
- COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. *In*: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), Brasília, 2006.
- ESPERANCINI, Maura S. T. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do Estado de São Paulo, vol.27, n.1, pp.110-118. Departamento de Engenharia Rural FCAV/UNESP, 2007.
- IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Trabalho e Rendimento, Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios 2011-2012.
- JORDAN, R.A.; CORTEZ, L.A.B.; NEVES FILHO, L.C.; LUCAS JÚNIOR, J.L.; BALDASSIN JÚNIOR, R. Comparativo econômico do uso de uma bomba de calor para aquecimento e resfriamento de água em laticínios em relação ao aquecedor elétrico e o sistema de refrigeração convencional, 2004.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de esgotos domésticos. 4.^a edição. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- LETTINGA, G.; VANVELSEN, A. F. M.; HOMBA, S. W.; DEZEEU W W.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment especially for anaerobic treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, v.22, p.699-734, 1980.
- MARA, D. Domestic wastewater treatment in developing countries. London: Earthscan, 2003.
- NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão: a alternativa energética. 1.^a edição. São Paulo: Nobel, 1986.

DIMENSIONAMENTO DE UM BIODIGESTOR: APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS URBANOS...

PARANÁ, Lei Estadual n.º 12493 – Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná. Estado do Paraná: 22 de janeiro de 1999.

PARANÁ, Decreto n.º 6674 – Aprova o regulamento da lei n.º 12.493 de 1999. Sistema de Informações Ambientais (SIA): 04 de Dezembro de 2002.

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgotos. 1.ª edição. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

CAPÍTULO 7

Primeiro colocado no Prêmio Inova Sanepar

AUTOMAÇÃO NO CONTROLE DE PERDAS, IMPACTOS AMBIENTAIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Rodrigo Votre¹

¹ Tecnólogo em Automação Industrial da Unidade de Serviços Eletromecânicos da Região Metropolitana de Curitiba da Sanepar

** rvotre@sanepar.com.br*

RESUMO

O conhecimento sobre os processos dos sistemas de abastecimento de água (SAA), dos tipos de perdas existentes e das ferramentas de automação, é essencial para o entendimento das possibilidades de melhorias no desempenho desses. No saneamento, os principais atrativos para justificar o investimento em automação residem na melhoria da qualidade do tratamento e da distribuição de água, por meio de monitoramento e controle em tempo real, redução de custos operacionais, como o de produtos químicos, e substituição da operação nas unidades por operação remota, além da possibilidade de gerenciamento de energia elétrica consumida, de medições precisas dos volumes de água produzida e distribuída e do controle das variáveis de processo, como pressão, nível e vazão. Entretanto, as maiores dificuldades encontradas em um SAA são a quantidade de água perdida e o impacto ambiental gerado, tanto na necessidade de construção de novos sistemas de abastecimento,

como nos danos provocados por vazamentos e rompimentos. Para redução destes fatores, foi proposto um estudo de caso avaliativo em um sistema de abastecimento de água da SANEPAR em Curitiba – PR, Centro de Reservação (CR) Portão, antes e após a revitalização da automação, visando validar o controle de pressão automatizada via *set point* de pressão, que possibilita o controle da variação de velocidade dos conjuntos motobomba (CMBs) acionados por conversores de frequência, buscando a pressão requerida, ligando ou desligando bombas complementares, se necessário. Este estudo de caso demonstra o ganho proporcionado pelo controle de pressão automatizado, tanto na redução de perdas de água, na redução de manutenções nas redes de distribuição, como na redução do gasto de energia elétrica, e visa a melhoria contínua dos processos, colaborando para otimizar o sistema de abastecimento, minimizando possíveis falhas, danos ambientais e financeiros.

Palavras-Chave: sistema de abastecimento de água, conjunto motobomba, centro de reservação, *set point*.

INTRODUÇÃO

O saneamento ambiental passa por um momento de preocupação mundial sobre o uso e a qualidade da água, recurso essencial à saúde da população, no qual é preciso uma reavaliação dos potenciais naturais e do comportamento de consumo, de modo a reduzir as perdas e evitar os desperdícios.

No Brasil, segundo último levantamento feito pelo SNIS (2014), 37% de toda a água produzida é perdida, fazendo com que seja necessária a exploração de novas fontes de água para o abastecimento, enquanto que no estado do Paraná, foco da pesquisa, esse índice chega a 32,49%. O advento da automação busca alterar tal cenário, auxiliando na redução das perdas, fornecimento de água com qualidade e regularidade e de forma acessível, pensando na atual e nas futuras gerações.

Este trabalho apresenta os processos existentes em um sistema de abastecimento, a questão das perdas de água, de seus indicadores e demonstra a importância em se realizar o controle de pressão, apresentando a automação como uma ferramenta importante, que permite gerenciar a medição e controle das variáveis, com o objetivo de promover a eficiência energética, reduzir os impactos ambientais, reduzir as perdas e otimizar a operação, em busca da sustentabilidade econômica, financeira e socioambiental, que podem ser evidenciadas nos resultados obtidos do trabalho. Além disso, prevê subsidiar a SANEPAR na análise do custo benefício de investimentos, seja em novos sistemas ou na revitalização de sistemas existentes.

METODOLOGIA

A pesquisa foi elaborada através de estudo de caso realizado na SANEPAR e investigou o efeito da automação no controle da pressão em um sistema de abastecimento de água com o uso de conversores de frequência nas elevatórias do CR Portão. O tipo de estudo de caso escolhido para este trabalho foi o estudo de caso avaliativo, que busca fornecer informações para a tomada de decisões.

Através do método de amostragem, foi realizado um levantamento comparativo no CR Portão, onde se definiram períodos de tempo que pudessem representar a diferença real na gestão das pressões, controle de perdas e eficiência energética do sistema antes e após o controle de pressão automatizado. Este estudo consiste em pesquisa documental extraída de relatórios, livros e artigos, que possibilitaram avaliar o desempenho do sistema durante o período selecionado.

Para analisar o desempenho do sistema implementado, comparando o seu funcionamento com o sistema anterior, foram coletados diversos dados e gráficos do sistema supervisorio (SCADA), da Unidade de Serviço de Produção e Distribuição (USPD), da Unidade de Projetos Especiais (USPE), da Unidade Regional Curitiba Sul (URCTS), do custo da água tratada da ETA Iguaçu que abastece o sistema avaliado, do valor cobrado pela SANEPAR para cada tipo de cliente, além dos dados dos sistemas de informações da SANEPAR, SIS WEB e SAPIENS, como volumes produzido e consumido, para serem utilizados em busca da quantificação de resultados da redução de perdas de água e redução de energia elétrica consumida pelo sistema de abastecimento, de modo a criar informações úteis para análise, otimização e validação do controle de pressão implementado, que permitiram calcular e demonstrar os indicadores de desempenho do sistema, além de mensurar o ganho de capital oriundo da redução de perdas de água em relação ao valor faturado pela empresa e demonstrar o retorno sobre investimento da automação no CR Portão.

É importante frisar que durante os períodos avaliados, tanto os motores, quanto as zonas de pressão foram os mesmos e que, em ambos os casos, havia comandos e *status* das bombas e da pressão pelo supervisorio, mudando apenas a forma de acionamento e controle operacional e que, além da automação, existem outras variáveis sobre a extensão de um sistema de abastecimento de água, como a manutenção das tubulações, as substituições dos anéis de interligações hidráulicas e o controle de fraudes, que colaboram para a manutenção e a melhoria contínua do sistema. A pesquisa ficou restrita aos meses de maio, pois em abril de 2012 foram trocados os CMBs e em junho foram instalados os conversores de frequência.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de abastecimento público de água constitui-se no conjunto de obras, instalações e serviços, destinados a produzir e distribuir água a uma comunidade, em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da população, para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos (FUNASA, 2006). Ele é composto por diversas unidades como captação, adução, tratamento, reservação, elevatórias de recalque e distribuição.

Ao longo de um processo de distribuição de água tratada, uma parcela considerável de água é perdida, de maneira que, ao contabilizar o volume de água bombeado no início do processo, ou seja, volume produzido (VP) e o volume medido consumido pelos hidrômetros (VM) verifica-se uma discrepância considerável. Essa diferença volumétrica é denominada perda de água no sistema, que inclui as perdas reais ou físicas, rompimentos e vazamentos e as perdas aparentes, que é a água produzida, porém que não é medida e nem faturada em decorrência de ligações inativas, submedição dos hidrômetros e fraudes (REIS; CHEUNG, 2007).

Para contextualizar a qualidade dos sistemas de abastecimento de água em relação às perdas, são utilizados alguns indicadores, como, por exemplo, o indicador de perdas percentual (IP%) e o indicador de perdas por ligação (IPL).

O IP% relaciona a diferença do volume produzido (VP), ou seja, a água disponibilizada ao sistema, pelo volume medido (VM), que é a água consumida e devidamente registrada pelos medidores de água dos consumidores. O percentual desta diferença é a água perdida no sistema (TARDELLI FILHO, 2004).

Já o IPL representa um indicador volumétrico de desempenho, mais preciso que os percentuais, que relaciona a diferença entre volume disponibilizado (VP) e volume utilizado (VM), pelo número de ligações ativas e o período, número de dias avaliado. Seu valor é representado em litros por ligação por dia (ABES, 2013).

Desses dois, o indicador mais utilizado é o indicador de perdas percentual (IP%), que relaciona o volume perdido total com o volume fornecido. Eles são classificados como bons, quando abaixo de 25%, como regular entre 25% e 40% e como ruim quando maior que 40% (TARDELLI FILHO, 2004).

Nesse cenário, as empresas de saneamento estão sendo conduzidas a uma reflexão porque precisam se reinventar para reduzir ou antecipar os problemas de vazamentos, buscando soluções e inovações tecnológicas que viabilizem o aumento de eficiência nos SAA.

Os sistemas de automação e as variáveis de medição constituem-se como base fundamental e ferramenta indispensável para tal propósito, especialmente quando

tratamos do controle de perdas, pois possibilitam conhecer o funcionamento da rede de abastecimento através da mensuração e controle de seus principais parâmetros de processo, vazão, pressão e nível, viabilizando assim o aumento da eficiência operacional. Somente através dos processos de medição é possível conhecer, diagnosticar, alterar e avaliar as diversas situações operacionais de um sistema de abastecimento (TARDELLI FILHO, 2004).

O controle da pressão de funcionamento de uma rede de distribuição, quer no que se refere ao seu valor médio ou à sua variação temporal, assume cada vez mais um papel determinante no bom desempenho técnico e econômico do sistema, na satisfação e no conforto dos consumidores. Se, por um lado, o controle da pressão garante um nível de serviço mais uniforme e permite à entidade gestora a utilização de condutores e acessórios mais econômicos, por outro lado reduz a frequência de ocorrência de rupturas e as perdas de água na rede (COVAS; RAMOS, 2007).

Covas e Ramos (2007) salientam ainda, que entidades gestoras que usam, ou pretendem usar, o controle de pressão como parte de sua estratégia de controle de perdas deverão considerar aspectos como a importância de manter as pressões com variações mínimas, a relação entre pressão máxima e a taxa de ocorrência de novas fugas e a relação entre pressão e a vazão das fugas existentes.

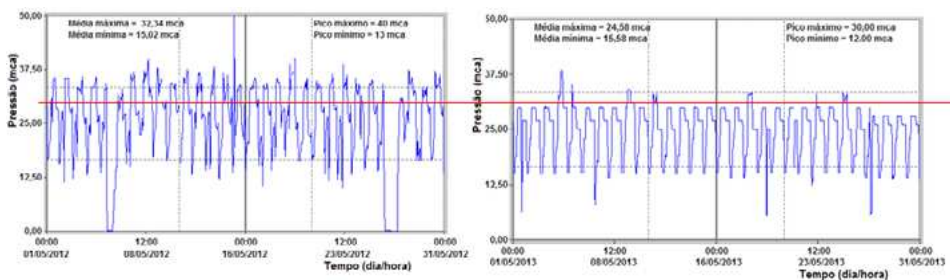
A forma mais eficiente de se controlar a pressão em um sistema de abastecimento de água é o controle de velocidade da bomba, principalmente quanto mais elevada for a componente de perda de carga dinâmica em relação à carga total do sistema. Esse controle permite a modulação da pressão de acordo com o consumo ao longo do dia, o que, entre outras vantagens, reduz a ocorrência de sobre-pressões na rede, reduzindo as perdas reais (WINNISCHOFER 2013).

Através de um sensor de pressão na linha de recalque, o sinal elétrico, geralmente entre 4 e 20 mA, é enviado para o controlador lógico programável (CLP), que, a partir do controle proporcional, integral, derivativo (PID), ao perceber um aumento de pressão na rede de água, reduz automaticamente a velocidade de rotação do motor para manter o valor desejado de pressão. Quando a pressão é menor que a estabelecida pelo usuário, o conversor aumenta a velocidade de rotação do motor (ROCHA, 2011). Esse controle possibilita também a eliminação do excesso de pressão no sistema e reduz proporcionalmente as perdas reais de água e de consumo, obtendo-se assim um duplo ganho: redução da demanda e consumo elétrico e redução do volume disponibilizado (BEZERRA, SILVA, 2009).

No estudo de caso a seguir, é possível validar a bibliografia apresentada e demonstrar os resultados obtidos após a implementação do controle de pressão automatizado no CR Portão.

A Figura 1 demonstra a pressão do sensor PT01, referente ao período de maio de 2012 a maio de 2013, em escala de 0 a 50 mca, variações, amplitudes e picos máximos e mínimos.

Figura 1 – Evolução da pressão no sensor PT01 de maio de 2012 a maio de 2013.



Nota: 1mca, (metro de coluna de água) equivale a 9806,65 Pa ou a 0,0980665 bar.
Fonte: adaptado de SANEPAR – SCADA, 2016.

A partir da análise do gráfico de maio de 2012, foi possível encontrar várias causas citadas na revisão bibliográfica por Tardelli Filho (2004,) e Covas e Ramos (2007), que identificam situações inadequadas no funcionamento de um sistema de abastecimento de água e aumento da probabilidade de fugas e rupturas nas tubulações da rede de distribuição, tais como: oscilações de pressão, amplitude entre a pressão mínima e máxima durante os regimes transitórios e a frequência das oscilações de pressão. Observa-se que, após a automação — gráfico de maio de 2013 — a pressão obedeceu a padrões pré-estabelecidos quanto aos seus valores e variações temporais, estabilizando-se e formando um gráfico uniforme.

Comparando-se os gráficos, é possível fazer a analogia entre as médias de maior e menor pressão dos períodos avaliados, quando a redução da amplitude entre as pressões após revitalização da automação representou um percentual de 48,04% em comparação ao período anterior, além de uma redução em torno de 24,44% em relação ao número de oscilações, as quais, segundo os autores Gomes, Otero e Coura (2009) garantem um nível de serviço mais uniforme à população e reduzem a frequência de ocorrência de rupturas e perdas de água na rede de distribuição.

Essa redução de danos à tubulação, assim como o aumento de vida útil dos materiais e equipamentos, pode ser verificada na Tabela 1 e demonstra o número de manutenções realizadas nos ramais e redes de distribuição nos períodos de tempo selecionados para a análise, que, além de reduzir o custo de manutenção, ajudam a preservar a imagem da SANEPAR e os impactos ambientais decorrentes desses danos.

Tabela 1 – Manutenção de redes e ramais de distribuição.

Período	Conserto de redes	Conserto de ramais
Maio 2012	38	93
Maio 2013	34	50
Diferença	- 04	- 43
Redução (%)	- 10,52	- 46,23

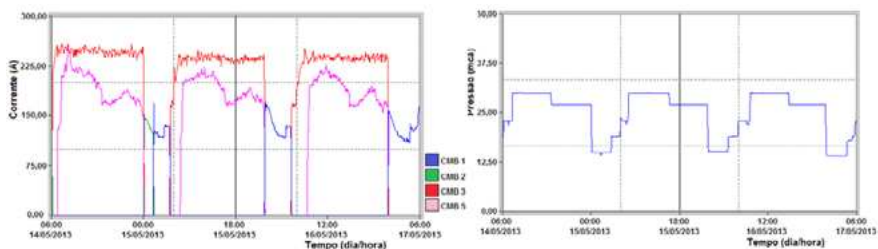
Fonte: adaptado de SANEPAR – SAPIENS, 2016.

Rodriguez e Luvizotto Junior (2013) salientam que a variação da rotação do motor, além de preservar tubulações e equipamentos, que antes da automação recebiam pressão e vazão a plenas cargas fornecidos pelos CMBs, com necessidade de restringir válvulas com enorme perda de carga e desgastes para tentar controlar a pressão, propiciam também a redução do gasto energético no funcionamento e no controle dos conjuntos motobombas do sistema.

No estudo, também é possível analisar os resultados da eficiência energética do novo sistema, comparando o funcionamento dos volumes de água distribuída, do gasto energético e do funcionamento do sistema com os conversores de frequência, que alteraram a forma de operação do processo, pois apesar de o sistema antigo ter *status* remoto do funcionamento das bombas, estas trabalhavam a plena carga, com controle de pressão feito por operadores via estrangulamento de válvulas.

O gráfico a seguir, Figura 2, mostra os valores de corrente elétrica dos CMBs em maio de 2013, em escala de 0 a 300 A, e a variável de pressão, em escala de 0 a 50 mca, delimitadas a um período de 3 dias, no qual é possível fazer uma analogia entre a corrente dos motores em relação à pressão requerida pelo sistema e analisar a importância deste tipo de controle para a eficiência energética, o controle dos equipamentos e dos processos no sistema de abastecimento.

Figura 2 – Evolução da corrente e pressão em maio 2013 (3 dias).



Fonte: adaptado de SANEPAR – SCADA, 2016.

A análise dos gráficos atesta que o controle de pressão automatizado, além de diminuir o patamar e a diferença entre as variações de pressão, reduziu o nível de consumo energético, pois, segundo Silva (2009), quando o motor trabalha com uma frequência menor em busca da pressão requerida, também trabalha com uma corrente menor, o que diminui o consumo de energia elétrica.

Para calcular os resultados do trabalho em relação à energia elétrica, foi necessário usar a mesma base de dados, ou seja, dividir os dados de energia elétrica pelo período de leitura de cada mês - maio de 2012 (29 dias) e maio de 2013 (31 dias) - e multiplicar pelos 31 dias do mês de maio.

Esses resultados podem ser verificados na Tabela 2 e incluem os dados calculados do IP% e IPL do CR Portão, aos demais ganhos do sistema. Quanto ao volume produzido apresentado, este é oriundo do recalque de água do CR Corte Branco, que alimenta o CR Portão via adutora de transferência.

Tabela 2 – Resultados do controle de pressão.

Resultados gerais	Maio 2012	Maio 2013	Aumento/ Redução (%)
Amplitude pressões médias (mca)	17,32	9,00	- 48,04
Amplitude pressões de pico (mca)	27,00	18,00	- 33,33
Volume produzido (m ³)	1.532.266	1.454.856	- 5,05
Volume consumido (m ³)	972.266	995.947	+ 2,43
Volume perdido (m ³)	560.000	458.909	-18,05
Número de ligações ativas	39.314	39.860	+ 1,38
IP% (%)	36,54	31,54	- 5
IPL (L.ligação ⁻¹ .dia ⁻¹)	474,80	383,76	-19,17
Consumo de energia (kWh)	168.814	143.342	- 15,08
Indicador (kWh.m ⁻³)	0,110	0,098	- 10,90
Fatura de energia elétrica (R\$)	53.203,72	39.596,27	- 25,57
Custo Total da Fatura (R\$.m ⁻³ . 1000 ⁻¹)	54,72	39,75	- 27,44
Indicador proposto (kWh.ligação ⁻¹ .dia ⁻¹)	0,138	0,116	-15,94

Fonte: adaptado da SANEPAR, 2016.

Nota:1mca equivale a 9806,65 Pa ou a 0,0980665 bar.

O cálculo da redução na fatura de energia elétrica de um período para o outro, maio de 2013 em relação a maio de 2012, foi de R\$ 13.607,45, uma redução de 15,08% no consumo de energia, enquanto a redução do indicador de KWh.m^{-3} foi de 10,90% e a redução do novo indicador proposto, relação do consumo de energia pelo número de ligações ativas e número de dias avaliado ($\text{KWh.ligação}^{-1}.\text{dia}^{-1}$), foi de 15,94%. Este novo indicador faz uma relação direta da eficiência energética, pois relaciona a energia elétrica consumida em relação a cada ligação ativa do sistema.

Com as informações do trabalho apresentado, junto ao custo da água que chegou ao CR portão em maio do ano de 2013, de 1,43 $\text{R}\$.\text{m}^{-3}$, e do valor faturado para cada tipo de ligação ativa do CR Portão, comercial a 4,78 $\text{R}\$.\text{m}^{-3}$, residencial a 3,54 $\text{R}\$.\text{m}^{-3}$ e tarifa social de 0,62 $\text{R}\$.\text{m}^{-3}$, também foi possível mensurar a economia da redução das perdas de maio de 2013 em relação a maio de 2012, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Retorno sobre investimento em relação à redução de perdas de água.

	Valor faturado pela Sanepar	Custo fornecimento de água
Economia - perdas de água (R\$)	394.373,38	155.689,82
Economia de energia elétrica (R\$)	13.607,45	13.607,45
Custo da Automação (R\$)	576.913,31	576.913,31
Retorno sobre investimento (Mês)	1,41	3,40

Fonte: O autor, 2016.

CONCLUSÕES

A partir do controle de pressão automatizado apresentado nesse trabalho, foi possível reduzir as perdas de água no CR Portão de 36,54% em maio de 2012 para 31,54% em maio de 2013, reduzir o IPL em 19,17%, a oscilação de pressão em 48,04%, a manutenção das redes de distribuição em 10,52%, a manutenção de ramais de distribuição em 46,23%, o consumo de energia elétrica em 15,08%, além da diminuição proporcional da fatura de energia para o sistema de bombeamento em 25,57%, o que representou a economia de R\$ 13.607,45 no período de um mês, validando esse método de controle como uma excelente medida para eficiência energética, redução de perdas de água e dos impactos ambientais relacionados a essas perdas, como rompimentos e vazamentos de água no meio ambiente.

A consequência da redução do IPL, junto aos valores cobrados pela SANEPAR em 2013 para cada tipo de cliente, possibilitou calcular o valor do potencial de ganho

monetário em maio de 2013 pela empresa em relação à redução de perdas de maio de 2012, que representou o valor de R\$ 394.329,93. Paralelamente, em relação aos custos de fornecimento de água ao cliente final, essa redução de perdas com o controle de pressão automatizada representou R\$ 155.689,82.

Com o cálculo desses valores, junto ao custo de implantação da automação no sistema, de R\$ 576.913,31, foi possível mensurar a viabilidade financeira do sistema de automação implementado no CR Portão. Extrapolando os resultados obtidos para os meses seguintes, o retorno sobre tal investimento deu-se em aproximadamente 2 meses sobre o valor faturado pela SANEPAR e em aproximadamente 4 meses sobre o custo da água distribuída pela empresa.

Além dos dados que comprovaram a eficiência em se investir na automação e no controle dos processos, este trabalho pode ser usado como referência na justificativa do uso de ferramentas tecnológicas para o saneamento, na qual as empresas que aderirem a este tipo de ferramenta contarão com um diferencial que garantirá redução de custos, redução de perdas e aumento da produtividade, pois a utilização de informações em tempo real permite a correção de problemas de forma rápida e precisa, aumentando a eficiência dos processos.

Mais importante que o retorno financeiro obtido com o controle de pressão, é a mitigação das perdas, que, além de aumentar a oferta de água à população, sem a necessidade de novas obras e danos ao meio ambiente, diminuem as incidências de rompimentos ou vazamentos de água e dos impactos ambientais gerados.

A situação vivida em 2014 no estado de São Paulo, que segundo o SNIS (2014) possuía 32,95% de perdas de água, justifica as ações em relação ao controle de perdas, como mostra este trabalho. A redução da quantidade de água perdida talvez fosse o suficiente para manter a disponibilidade de água para a população.

Junto a este trabalho fica a proposta da elaboração de um novo indicador de eficiência energética no saneamento, que possa demonstrar o perfil de consumo médio diário por ligação ativa, que seria o consumo de energia dividido pelo número de ligações ativas e pelo número de dias avaliado (KWh/ligação*dia).

REFERÊNCIAS

- ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Perdas em sistemas de abastecimento de água: São Paulo. 2013. Disponível em < [http:// www. abes- sp. org. br/ arquivos/ perdas. pdf](http://www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas.pdf) >. Acesso em 28 de Junho de 2014.
- BEZERRA, S. de. T. M.; SILVA, S. A. da. Automação e controle. *In*: GOMES, H. P. (Org.). Sistemas de bombeamento – Eficiência energética. João Pessoa: Editora UFPB, 2009. p.203-250.
- COVAS, D.; RAMOS, H. Minimização de perdas de água em sistemas de abastecimento. *In*: GOMES, H. P.; GARCÍA, R. P.; REY, P. L. I. (Org.). Abastecimento de água. João Pessoa: Editora UFPB, 2007.
- FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. 4.^a edição – Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006 - Núcleo de editoração e mídias de rede/Ascom/Presi/Funasa/ MS.
- GOMES. A. S; OTERO, O. L. C. de; COURA, S. P. de. Ações de eficiência energética. *In*: GOMES, H. P. (Org.). Sistemas de bombeamento – Eficiência energética. João Pessoa: Editora UFPB, 2009. p. 297 – 334.
- REIS, L. F. R.; CHEUNG, P. B. Os vazamentos nas redes de distribuição de água. *In*: GOMES, H. P.; GARCÍA, R. P.; REY, P. L. I. (Org.). Abastecimento de água. João Pessoa: Editora UFPB, 2007. p.67-84.
- ROCHA, A. M. P. da. R. Automação na SABESP. Revista Intech, São Paulo, número 135, p. 7-19, 2011.
- RODRIGUES, W; LUVIZOTTO JUNIOR, E. Inversor de frequência em sistemas de bombeamento. São Paulo, fev. 2013. Disponível em: <[http://www. saneamentobasico. com. br / portal / wpcontent / uploads / 2013/02/INVERSORSISTEMAS-BOMBAMENTO. pdf](http://www.saneamentobasico.com.br/portal/wpcontent/uploads/2013/02/INVERSORSISTEMAS-BOMBAMENTO.pdf)>. Acesso em: 20/02/2014.
- SANEPAR. Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados – SCADA . Curitiba, 2016 – Aquisição dos gráficos de pressão e corrente.
- SANEPAR. Sistema de Informações da Sanepar - SIS WEB. Curitiba, 2016. Banco de dados da SANEPAR.
- SANEPAR. Sistema de Análises e Solução de Problemas de Perdas da Sanepar – SAPIENS. Curitiba, 2016. Banco de dados da SANEPAR.
- SANEPAR. Custo de produção de água e consumo energético. USPD. Curitiba 2016.
- SANEPAR. Custos de implantação da Automação. USPE. Curitiba 2016.
- SANEPAR. Dados do volume macro medido. URCTS. Curitiba 2016.
- SILVA, S. A. da. Acionamentos de motores elétricos. *In*: GOMES, H. P. (Org.). Sistemas de bombeamento – Eficiência energética. João Pessoa: Editora UFPB, 2009. p. 113-166.
- SNIS - Sistema nacional de informações sobre Saneamento (2014). Disponível em: <[http:// www. snis. gov. br](http://www.snis.gov.br)>. Acesso em 30/06/2016

TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. *In*: TSUTIYA, M. T (Ed.). Abastecimento de água. São Paulo: Editora, 2004. p.457-525.

WINNISCHOFER, G. Inversores de frequência x válvulas de controle: uma comparação sob o ponto de vista do custo incorrido durante o ciclo de vida. Revista Intech, São Paulo, n. 149, p. 37 – 42, 2013.

CAPÍTULO 8

Segundo colocado no Prêmio Inova Sanepar

OTIMIZAÇÃO DA MACRODISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO INTEGRADO DE CURITIBA – SAIC

Katia Regina Garcia da Silva^{1}
Edymilson Luiz dos Santos²
Fabio Alexander Basso³*

¹ Engenheira Civil do Centro de Controle Operacional da Unidade de Serviço de Produção e Distribuição da Sanepar

² Engenheiro Civil do Centro de Controle Operacional da Unidade de Serviço de Produção e Distribuição da Sanepar

³ Engenheiro Eletricista do Centro de Controle Operacional da Unidade de Serviço de Produção e Distribuição da Sanepar

* katiagarcia@sanepar.com.br

RESUMO

O custo de energia elétrica do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC) representa cerca de 23% do custo energia para bombeamento em sistemas de abastecimento de água da Sanepar. A otimização operacional de transporte e reservação de água tratada é uma importante alternativa para redução desse custo, pois busca o melhor aproveitamento da infraestrutura existente (não tendo como premissa a necessidade de investimentos financeiros). A Unidade de Produção de Curitiba (USPD), através do Centro de Controle Operacional (CCO), vem investindo esforços de toda a equipe para obter e manter os melhores resultados de custo de

energia elétrica, fazendo gestão de produção e transporte, no intuito de minimizar essas atividades no horário de ponta, que é o período em que a energia custa aproximadamente quatro vezes mais. A economia obtida com este trabalho acumulou até junho de 2016 o montante aproximado de 2,37 milhões de reais, mostrando-se um resultado muito expressivo.

Palavras-Chave: otimização operacional, eficiência energética.

INTRODUÇÃO

O SAIC representa cerca de 35% das receitas da Sanepar, distribui volume de 290 milhões $\text{m}^3\cdot\text{ano}^{-1}$ e consome 175,3 milhões $\text{kWh}\cdot\text{ano}^{-1}$. O custo de energia elétrica deste sistema representa aproximadamente 23% do custo energia para bombeamento em sistemas de abastecimento de água da empresa.

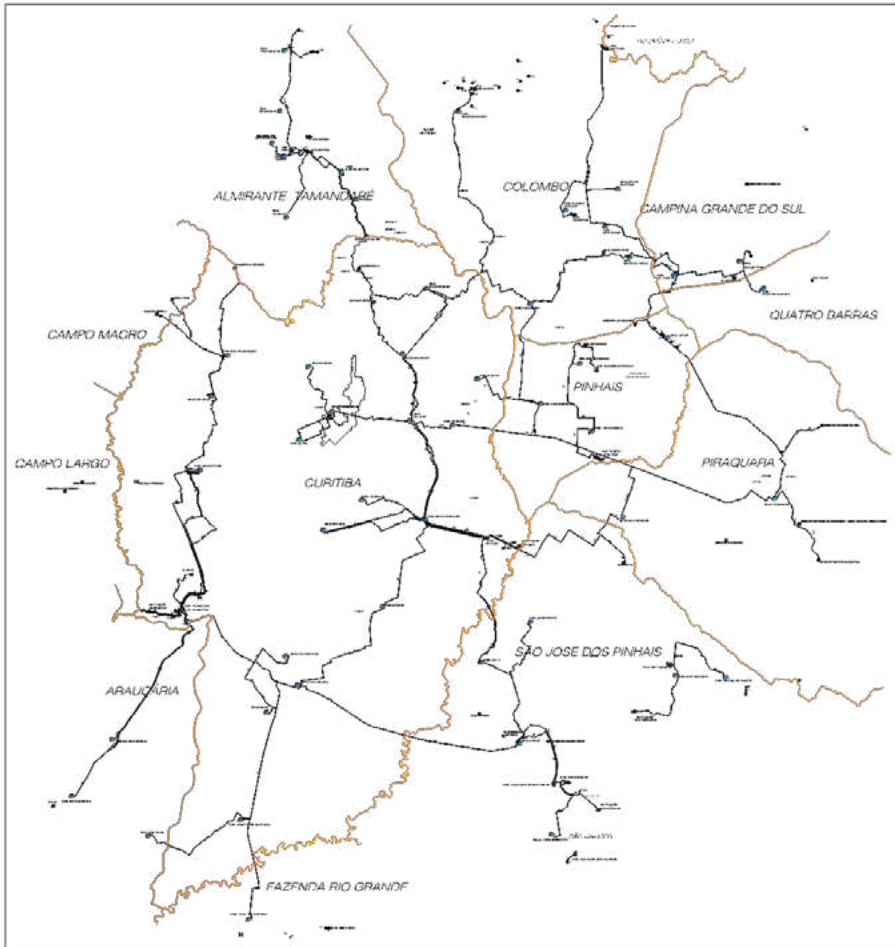
A otimização operacional de transporte e reservação é uma importante alternativa de redução de custo de energia elétrica, pois, em muitos casos, não há necessidade de bombeamento 24 $\text{h}\cdot\text{dia}^{-1}$ (Tsutiya, 2006). O custo de energia elétrica é variável e é maior no horário de ponta, das 18 às 21 horas nos dias de semana, de forma que o transporte de água por bombeamento deve ser minimizado neste intervalo.

O objetivo deste trabalho é apresentar as ferramentas, a evolução da estratégia operacional para redução de transferência de água entre reservatórios (macrodistibuição) no horário de ponta e a consequente economia que foi alcançada.

METODOLOGIA

O CCO da USPD é responsável pela macrodistribuição entre 50 centros de reservação a partir de 7 Estações de Tratamento de Água (ETAs), que são: Iguaçu, Iraí, Passaúna, Miringuava, Rio Pequeno, Karst e Despique. O SAIC constitui-se em uma complexa malha de distribuição. Na Figura 1 é apresentado o mapa do SAIC, que abastece Curitiba e municípios no entorno: Colombo, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, Pinhais, Piraquara, São José dos Pinhais, Fazenda Rio Grande, Araucária, Campo Largo (parcial), Campo Magro e Almirante Tamandaré.

Figura 1 – Mapa do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba.



Fonte: Sanepar, 2016.

A USPD tem longo histórico de trabalhos realizados na otimização de transporte na macrodistribuição (Silva & Gomes, 2007). A partir de 2015 foi intensificado o controle, com maior envolvimento da coordenação de produção, o que tem mostrado excelentes resultados.

Sistema de Supervisão e Controle

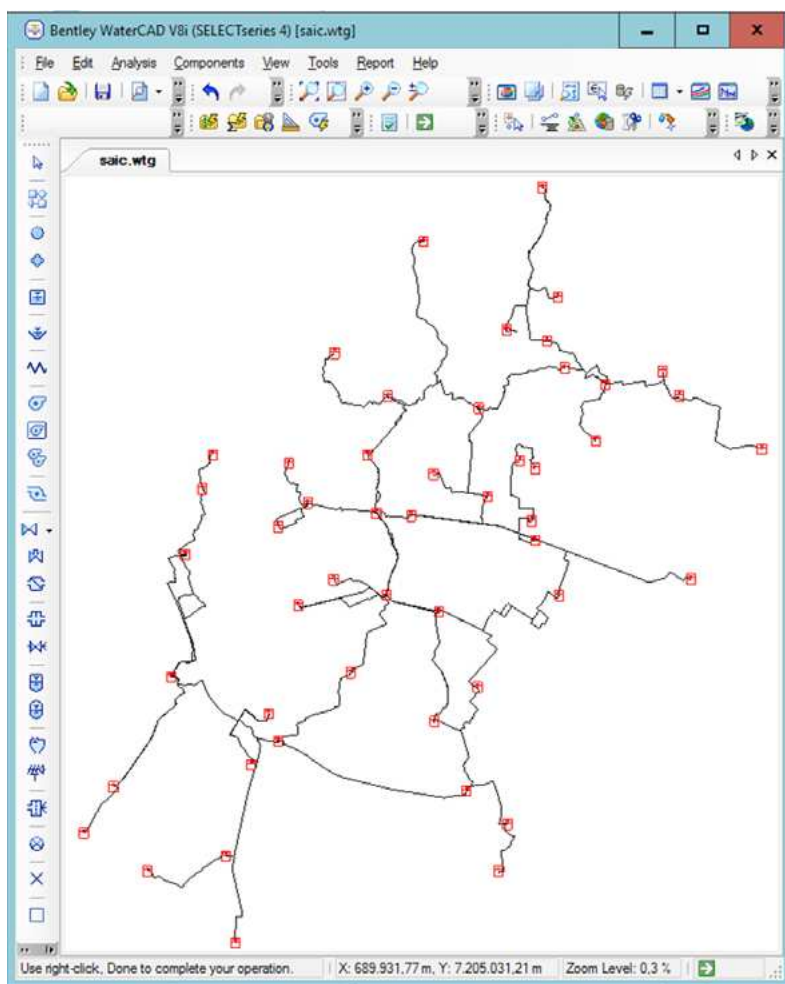
O SAIC conta com sistema de supervisão e controle (SSC), que armazena dados históricos e possibilita análise dos padrões de abastecimento e equilíbrio do sistema. Além de armazenar dados históricos como vazões, pressões, níveis, status de bombas e válvulas de controle e variáveis elétricas, o SSC permite o controle remoto de todas as unidades do SAIC e gera alarmes de anormalidades.

Modelagem hidráulica

É mantida a modelagem hidráulica do sistema macrodistribuidor, na qual são considerados os dados históricos, estudos de demandas, volumes de reserva, capacidade de produção e de transporte [SNS(1), 2016]. A Figura 2 mostra o modelo hidráulico do SAIC.

Em função da implantação da ISO 9001 na unidade, a partir de 2013, os padrões operacionais têm sido descritos e mantidos.

Figura 2 – Modelo hidráulico do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba.



Fonte: Sanepar, 2016.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A equipe de operação trabalha em regime de escalas, monitorando e controlando o sistema durante 24 horas por dia. Além de manter o abastecimento com pressões adequadas, outro objetivo principal da operação é reduzir ao máximo a produção e o transporte de água no horário de ponta. Nesse intuito, as ações das equipes são para obter os melhores níveis de reserva no início desse horário [SNS(2), 2016].

Para cada tramo do sistema, foram avaliadas de jusante para montante as vazões necessárias, chegando-se a determinar a vazão de transporte em cada trecho e produção necessária nas ETAs.

Devido à dinamicidade do sistema de abastecimento (variações de demanda, de produção e transporte, falhas e intervenções para manutenção), a produção e o transporte no horário de ponta a cada dia devem ser avaliados pela equipe responsável pela operação, seguindo parâmetros básicos estabelecidos e demais variáveis, como, por exemplo, manobras programadas, temperatura e pluviosidade.

Através de modelagem hidráulica, para cada reservatório do sistema é definido o nível mínimo que pode ser atingido no horário de ponta. Nessa definição, avalia-se se a reposição de nível que será possível, ou seja, o equilíbrio entre demandas de jusante e capacidade de transporte a montante, além do volume disponível de reserva. Como exemplo, na Figura 3 é mostrado um tramo do sistema: Passaúna-Santa Felicidade.

Figura 3 – Esquema do tramo Passaúna-Santa Felicidade.



Fonte: Sanepar.

As vazões de distribuição são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Vazões de distribuição (L.s⁻¹).

Unidade	Vazão média	Vazão horário de ponta
Santa Felicidade (SFL)	147	153
São Braz (SBR)	148	155
Campo Comprido (CCO)	369	415
Passaúna (PAS)	465	492

Fonte: Sanepar, 2016.

Conforme a Tabela 2, a produção e a transferência no horário de ponta para o sistema Passaúna-Santa Felicidade podem ser bastante reduzidas, porém, como já comentado, o sistema é dinâmico e há variações que alteram o cenário de cada dia.

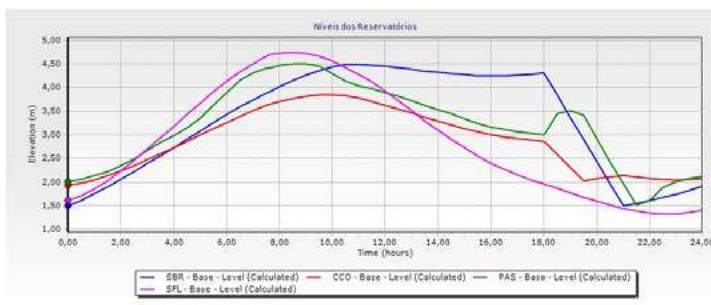
Tabela 2 – Vazões de transporte entre reservatórios (L.s⁻¹)

Tramo	Capacidade máxima	Média	Mínima no horário de ponta
SBR – SFL	207	147	0
CCO – SBR	353	295	0
PAS – CCO	830	664	0
PAS – outras transferências	668	503	150
Captação – PAS	1866	1.632	0

Fonte: Sanepar, 2016.

O modelo hidráulico é carregado com vazões médias e perfis usuais de consumo. A operação das bombas é ajustada buscando-se sua minimização no horário de ponta. Como resultado é apresentada no Gráfico 1 a variação dos níveis dos reservatórios.

Gráfico 1 – Variação dos níveis dos reservatórios



Fonte: Sanepar, 2016.

A partir do modelo, obtêm-se os parâmetros operacionais básicos (níveis iniciais recomendados, níveis mínimos no horário de ponta e a quantidade de bombas necessárias), que são implantados e avaliados continuamente, pois quando ocorrem alterações nos padrões são necessárias novas simulações hidráulicas.

Para o exemplo do tramo Passaúna-Santa Felicidade, os parâmetros são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis e operação no horário de ponta.

Unidade	Nível recomendado às 18h	Operação de transferência a partir da Unidade de montante	Nível às 21h
SFL	2,0 m	Manter por gravidade	1 ,4 m
SBR	4,3 m	0 bomba	1 ,5 m
CCO	2,9 m	0 bomba (18 às 19h) 1 bomba (19 a 21h)	2 ,1 m
PAS	3,0 m	Produção de 900 l/s(50 % da capacidade)	2 ,0 m

Fonte: Sanepar, 2016.

Os parâmetros básicos definidos após os estudos são convertidos em instruções operacionais (SNS(2), 2016), disponibilizados e aplicados pelas equipes responsáveis pela operação.

A avaliação contínua da eficácia dos procedimentos aplicados pela equipe operacional retorna para a equipe de suporte de engenharia para reanálise e ajustes, promovendo melhoria constante, rodando o ciclo PDCA.

Histórico de consumo na ponta

Com a intensificação dos trabalhos a partir de 2015, o índice de utilização na ponta, que é uma relação ponderada entre o consumo (kWh) na ponta e o consumo fora de ponta, apresentou queda aproximada de 65% para 43%, conforme mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Índice de utilização na ponta.



Fonte: Sanepar, 2016.

Esse índice sofre variações mensais, conforme aumenta ou diminui a demanda do sistema de abastecimento. Por exemplo, o mês de fevereiro de 2014 foi atípico, com temperaturas acima da média histórica e consequentemente aumento de demanda de água. Há a tendência de o índice ser maior nos meses quentes, quando o sistema trabalha mais próximo de sua capacidade efetiva.

O Gráfico 3 apresenta o consumo de energia no horário de ponta, evidenciando que, a partir de 2015, o consumo está 44% menor no horário de ponta, considerando-se a relação entre a média no período anterior (de 2011 a 2014) e a média de consumo a partir de 2015. É importante enfatizar que essas reduções ocorreram ao mesmo tempo em que o sistema de abastecimento está em pleno crescimento, com 2,9 % de acréscimo médio/ano de ligações.

Gráfico 3 – Consumo de energia no horário de ponta.



Fonte: Sanepar, 2016.

Utilizando as tarifas vigentes de junho de 2015 até junho de 2016, a economia financeira realizada no SAIC foi, conforme a Tabela 4, de 131.956,60 reais por mês.

Tabela 4 – Consumo médio mensal de energia no SAIC.

Consumo Médio Mensal	de 2011 a 2014	a partir de 2015	diferenças (kWh)	tarifas (R\$. kWh ⁻¹)	gasto (R\$)
Ponta (kWh)	666.643	462.916	-203.727	1,0463	-213.159
Fora de Ponta (kWh)	11.199.395	11.435.108	235.713	0,3445	81.203
				economia mensal (R\$)	131.956

Fonte: Sanepar, 2016.

CONCLUSÕES

A economia obtida com este trabalho acumulou até junho de 2016 o montante aproximado de 2,37 milhões de reais. É um resultado muito expressivo e fruto de grande esforço em equipe.

As orientações de operação são para situações típicas. No sistema, há variações conforme características específicas de cada trecho, dia de semana, temperatura, pluviosidade, além de falhas e manutenções que ocorrem rotineiramente, as quais influenciam o sistema e devem ser consideradas pela equipe, promovendo variações a partir das orientações estabelecidas.

O avanço na gestão de controle de energia elétrica, através do monitoramento em tempo real via internet, como já foi implantado em caráter piloto nas Unidades Captação Passaúna, ETA Iraí e Centro de Reservação Jacob Macanhan, facilitará correções na operação em curto prazo.

Os resultados até agora conseguidos poderão ser melhorados a medida que forem implantadas obras previstas no plano diretor, o que corrigirá deficiências de transporte e reservação no SAIC.

Há necessidade de aprimorar a formação dos operadores e disponibilizar ferramentas de decisão de curto prazo, como, por exemplo, o modelo matemático carregado automaticamente com dados do SSC para simulações de curto prazo.

REFERÊNCIAS

- SILVA, Katia Regina Garcia da; GOMES, Júlio. Análise de Cenários de Bombeamento Visando a Otimização da Operação de Transporte de Água Tratada no Sistema de Abastecimento Iguaçu. 24.º Congresso da ABES: XI-022. Belo Horizonte, MG. 2007.
- SNS (1), Sistema Normativo da Sanepar. IT/OPE/1804. Disponível em: <intra.sanepar.com.br>. Acesso em: 22 jun. 2016.
- SNS (2), Sistema Normativo da Sanepar. IT/OPE/1782. Disponível em: <intra.sanepar.com.br>. Acesso em: 22 jun. 2016.
- TSUTTYA, Milton Tomoyuki. Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água. 1.ª edição. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006. XV – 185 p.

CAPÍTULO 9

Terceiro colocado no Prêmio Inova Sanepar

USO RACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA COM A IMPLANTAÇÃO DA COMISSÃO INTERNA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CICE

Vanderlei Gonçalves da Silva^{1}
Priscila Oliveira de Souza Donadello Figueiredo²*

¹ Técnico Operacional, Gestor Centro de Controle Operacional da Unidade Regional
de Foz do Iguaçu da Sanepar

² Engenheira Civil da Unidade Regional de Foz do Iguaçu da Sanepar

* vanderleigs@sanepar.com.br

RESUMO

Diante de um panorama nacional e internacional de estresse hídrico e energético, a adoção de medidas de eficiência energética se torna cada vez mais necessária e urgente. Nesse sentido, o presente trabalho realiza um estudo de caso das medidas recentemente implementadas no Sistema de Abastecimento de Água (SAA) de Foz do Iguaçu. Proposta pela comissão interna de conservação de energia (CICE) da Unidade Regional de Foz do Iguaçu (URFI), com o apoio da equipe do centro de controle operacional e da engenharia da URFI, foi implementada nesse sistema a parada de estações elevatórias de água bruta e tratada no horário de ponta, o que resultou numa economia total de 86.351 kWh, equivalente a aproximadamente R\$120.000,00,

na comparação entre os oito primeiros meses dos anos de 2015 e 2016. Diante dos resultados apresentados, ficou evidente não apenas a eficácia das medidas implementadas, cujos retornos não se limitam apenas ao aspecto financeiro, mas também o entendimento de que é possível projetar e operar os sistemas de maneira mais eficiente. Dessa forma, conclui-se que o trabalho desenvolvido pela CICE da URFI, com o apoio dos coordenadores e da gerência da referida Regional, pode ser apresentado e replicado para as demais unidades e sistemas operados pela Sanepar.

Palavras-Chave: Eficiência energética, comissão interna de conservação de energia, horário de ponta.

INTRODUÇÃO

De acordo com os dados de 2014 divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (BRASIL, 2016), os SAAs são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 2,5% de toda a energia elétrica demandada no Brasil, o que representa cerca de 11,95 bilhões de kWh.ano⁻¹.

Nesse sentido, e considerando um panorama nacional e internacional de estresse hídrico e energético que tende a se acentuar nas próximas décadas por conta do crescimento populacional e dos padrões de consumo resultantes do crescimento socioeconômico de países pobres ou em desenvolvimento, a adoção de medidas de eficiência energética e hidráulica se torna cada vez mais necessária e urgente.

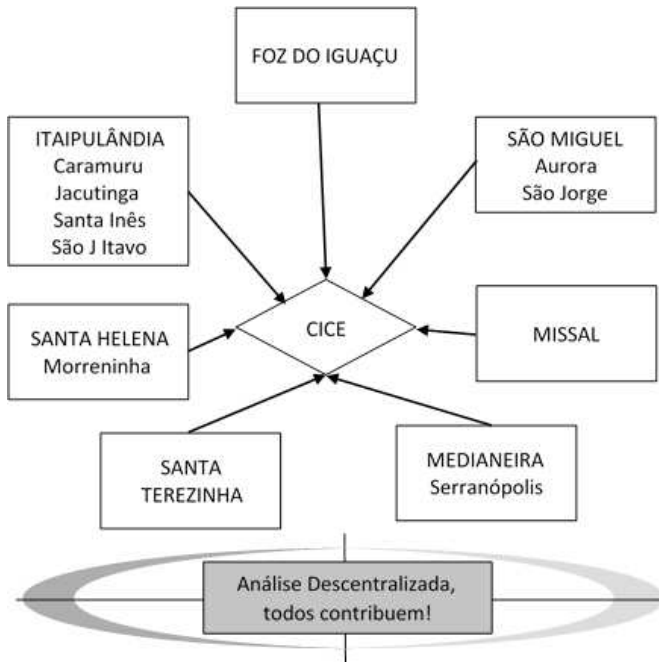
Tais medidas podem resultar numa economia de 25 a 50% no consumo de energia elétrica nos SAAs de acordo com Balestieri e Vilanova (2015). Considerando também as estimativas de Tsutiya (2005), de que as estações elevatórias de água bruta e tratada (EEABs e EETs) são responsáveis por 90% (ou mais) do consumo energético nesses sistemas, fica ainda mais evidente a importância de ações de eficiência energética localizada nessa etapa do processo.

Não obstante, buscar a eficiência energética nesses sistemas implica também ganhos de ordem financeira, na medida em que reduzem os custos com energia elétrica, os quais têm grande representatividade no orçamento das empresas. No caso da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), por exemplo, gastos com energia elétrica foram, em 2014, a segunda maior despesa da empresa, ficando atrás somente das despesas com pessoal. Dentro desse consumo energético, 91% estão relacionados aos SAAs, 8% aos sistemas de esgotamento sanitário (SES) e 1% a outros custos com energia elétrica. É importante considerar também que a promoção da eficiência energética pode representar ganhos ambientais e sociais, visto que

reduz o desperdício dos recursos, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa e promovendo a universalização dos serviços sanitários.

Nesse sentido, a URFI, cujo sistema de gestão ambiental (SGA) é certificado pela ISO 14.001, criou, em 24 de março de 2014, com o apoio da gerência da regional, uma Comissão Interna de Conservação de Energia Elétrica (CICE), com o objetivo de “buscar o uso eficiente de energia elétrica, de forma continuada, eliminando desperdícios, assegurando a redução de custos, tendo como premissa o uso racional de energia elétrica” (CICE, 2016). Essa comissão, cuja composição é dada por um coordenador e, pelo menos, um colaborador de cada sistema atendido pela URFI, atua de forma descentralizada (Figura 1) para: analisar possibilidades de redução do consumo específico de energia e demanda; estabelecer metas de redução; divulgar os resultados alcançados através do Portal da URFI; gerenciar as futuras alterações nos contratos de demanda; identificar as causas de multa de ultrapassagem de demanda; gerenciar o fator de carga e o fator de potência indutivo e capacitivo da instalação; subsidiar os estudos de conservação de energia e participar nos processos de aquisições e/ou manutenções que envolvam o consumo de energia elétrica; e identificar situações de desperdício de energia elétrica.

Figura 1 – Análise crítica descentralizada.



Fonte: CICE, 2016.

Desde sua criação, essa comissão foi responsável por diversas melhorias nos processos e nas ações da URFI, tais como: a análise das faturas de energia elétrica de cada sistema realizada pelo próprio colaborador da CICE (e não somente por uma única pessoa), a capacitação dos colaboradores por meio de treinamentos internos, a substituição de lâmpadas dos ambientes administrativos e operacionais e a parada de EEABs e EETs do SAA de Foz do Iguaçu no horário de ponta (entre 18 e 21 horas), período no qual a tarifa de energia elétrica fica aproximadamente três vezes mais cara, que foi uma das medidas de eficiência energética que obteve maior retorno financeiro para a empresa.

Dessa forma, seja pela necessidade de mitigação do estresse hídrico e energético, seja pela representatividade dos custos com energia elétrica no orçamento da SANEPAR, o objetivo desse trabalho é apresentar, por meio de um estudo de caso, a redução dos custos com energia elétrica na operação do SAA de Foz do Iguaçu a partir da parada no horário de ponta de estações elevatórias de água, investigando novas tendências a serem estudadas pela CICE.

METODOLOGIA

O estudo de caso é baseado no sistema de abastecimento de água (SAA) de Foz do Iguaçu, localizado no extremo Oeste do Paraná, na divisa do Brasil com o Paraguai e a Argentina.

O sistema produtor de Foz do Iguaçu abrange duas captações superficiais, uma localizada ao Sul da área urbana (próxima ao aeroporto) e outra ao Norte, no lago da barragem da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Essas captações possuem estações elevatórias que recalcam a água bruta às suas respectivas estações de tratamento de água: ETA Tamanduá, por meio da EEB03 e ETA Vila C, por meio da EEB02 e EEB04.

A ETA Tamanduá, que é responsável por abastecer aproximadamente 30% da população, é do tipo convencional, com floculadores, decantadores e filtros. Já a ETA Vila C, responsável por abastecer aproximadamente 70% da população, é do tipo filtração direta, sem unidades de decantação.

O sistema de distribuição conta com 14 reservatórios, totalizando um volume de reservação de 28.660 m³, divididos em 7 centros de reservação, que possuem as seguintes denominações: ETA Tamanduá (ETA-01), ETA Vila C (ETA-02), Vila A, Portal, Três Lagoas, RAP 4.000 e Cidade Nova. Conta também com 19 EETs, que juntas consomem aproximadamente 238.042 kWh/mês, sendo 6 dessas unidades pertencentes ao sistema adutor principal. Destas, três unidades (EET05, EET11 e EET16) recalcam unicamente, interligando os centros de reservação, e as outras três

(EET01, EET08 e EET20), que podem derivar para a rede de distribuição.

As elevatórias que recalcam do CR ETA Tamanduá ao CR RAP 4.000 e a do CR Portal ao CR Três Lagoas (EET01 e EET20, respectivamente), distribuem em marcha ao longo de seu caminhamento. Já a elevatória que recalca do CR Vila “A” ao CR RAP 4.000 (EET08), tem sistema manobrado por válvula de controle, derivando desta adutora à rede em algumas horas do dia.

As 13 estações elevatórias restantes operam como *booster*, recalcando de forma direta à rede de abastecimento. Sete destas unidades estão localizadas dentro dos centros de reservação com sucção a partir dos reservatórios e uma unidade na derivação de outra linha de recalque. As outras cinco unidades estão localizadas nos passeios das vias com recalque direto da rede.

A parada no horário de ponta de estações elevatórias, seja ela bruta ou tratada, é definida como parada de funcionamento no período em que a tarifa paga à concessionária de energia elétrica, pelo consumo de energia elétrica, é mais onerosa do que em outros períodos do dia. No caso da tarifa horossazonal verde, enquadramento tarifário em que se encontram as unidades consumidoras de Foz do Iguaçu, o período é das 18 até as 21 horas. No horário de verão, esse período é das 19 até as 22 horas.

Para o estudo de caso, primeiramente, a CICE verificou, com a equipe do centro de controle operacional (CCO) e com a área de engenharia da URFI, em quais elevatórias era possível realizar tal medida de eficiência energética. Foi verificado se o volume de reservação disponível no SAA era suficiente para abastecer a demanda do sistema no horário de ponta e se, tendo água disponível, os níveis de água nesses reservatórios eram suficientes para abastecer, por gravidade, as possíveis regiões cujo abastecimento fora do horário de ponta são abastecidas por estações elevatórias. Posteriormente, após definidas as elevatórias, as paradas no horário de ponta foram realizadas.

Por fim, de maneira a avaliar os resultados obtidos com a implementação de tal medida, comparou-se, para o período de janeiro a setembro (referência da SANEPAR) entre os anos de 2015 e 2016 (ano este em que foi implementado de maneira mais efetiva e consciente a parada das elevatórias no horário de ponta) o consumo em kWh no horário de ponta e o respectivo valor economizado, em termos monetários (R\$), para as unidades operacionais avaliadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após análise do CCO e da engenharia da URFI, as estações elevatórias elencadas para a parada no horário de ponta estão relacionadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados das estações elevatórias elencadas para a parada no horário de ponta.

Unidade Operacional	Estação Elevatória	Nº de conjuntos	Potência (CV)	Vazão (L.s ⁻¹)
Captação Vila C	EEB02	(3 + 1 Reserva instalada)	175	694
	EEB04	(2 + 1 Reserva instalada)	300	720
ETA Vila C	EET11	(3 + 1 Reserva instalada)	200	553
	EET16	1	50	111
CR Vila A	EET05	(2 + 1 Reserva instalada)	125	212
	EET08	(1 + 1 Reserva instalada)	75	228
CR Portal	EET20	(2 + 1 Reserva instalada)	40	88

Fonte: Sanepar, 2016.

Já no Quadro 2, estão apresentados os consumos realizados pelas unidades operacionais elencadas para a parada no horário de ponta.

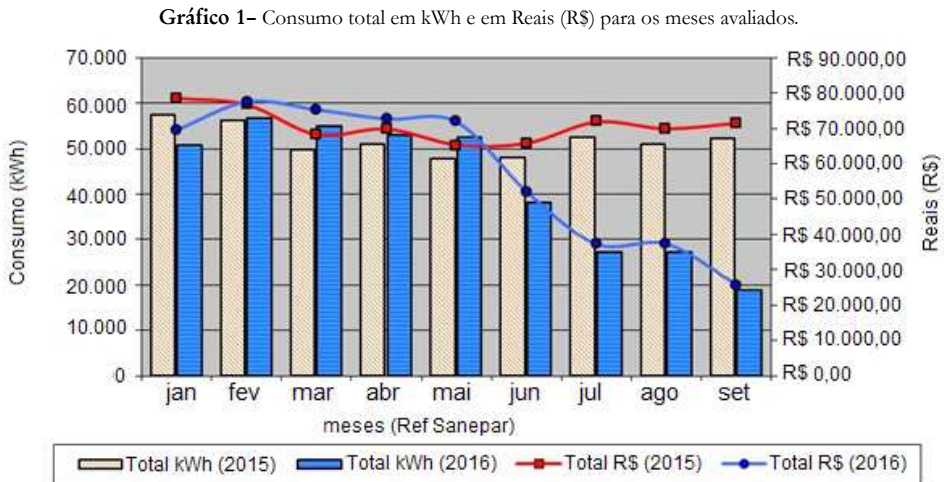
Quadro 2 – Consumos no horário de ponta das unidades operacionais.

N	Referência Sanepar	Consumo hora ponta – ano referência Sanepar	ETA Vila C (kWh)	EEB02/EEB04 (kWh)	CR Vila A (kWh)	CR Portal (kWh)	Total (kWh)
Dezembro	Janeiro	2015	17.165	19.741	14.795	5.627	57.328
		2016	16.622	17.166	11.602	5.358	50.748
Janeiro	Fevereiro	2015	18.054	18.887	13.582	5.493	56.016
		2016	17.685	20.469	13.529	4.906	56.589
Fevereiro	Março	2015	15.996	15.552	12.682	5.591	49.821
		2016	16.395	19.810	13.496	5.276	54.977
Março	Abril	2015	15.514	17.022	13.205	5.247	50.988
		2016	15.826	19.522	12.528	5.161	53.037
Abril	Maio	2015	14.244	14.661	12.701	6.120	47.726
		2016	16.308	18.767	12.533	4.828	52.436
Maio	Junho	2015	15.012	15.866	12.126	5.025	48.029
		2016	11.568	12.418	9.623	4.464	38.073
Junho	Julho	2015	16.489	17.660	12.750	5.526	52.425
		2016	8.289	7.489	7.248	4.179	27.205
Julho	Agosto	2015	16.524	17.375	11.776	5.355	51.030
		2016	7.206	7.617	9.134	3.317	27.274
Agosto	Setembro	2015	16.935	17.737	12.616	4.879	52.167
		2016	4.084	4.747	7.445	2.564	18.840

Fonte: Sanepar, 2016.

Observou-se que, em 2015, o consumo total no horário de ponta das unidades operacionais avaliadas foi de 465.530 kWh, enquanto que, para 2016, esse valor foi de 379.179 kWh. Esses resultados proporcionaram à empresa uma economia de 86.351 kWh, quando se compara 2015 com 2016. Considerando o valor da tarifa de R\$1,37 (valor na modalidade tarifária verde, para o horário de ponta e com 15% oferecido às empresas de saneamento – Referência Copel, Agosto de 2016), essa economia foi de R\$118.300,87 para o período avaliado.

Cabe ressaltar que, no período de fevereiro a maio de 2016, os valores totais consumidos em 2016 foram maiores do que para o mesmo período de 2015, conforme ilustra o Gráfico 1.



Fonte: Sanepar, 2016.

Essa constatação se deu provavelmente pelo fato de que a turbidez do Lago de Itaipu estava em condições atípicas, o que prejudicou o tratamento e, consequentemente, impossibilitou a efetividade da parada das elevatórias de água bruta EEB02 e EEB04 e das de água tratada EET11 e EET18 no horário de ponta.

Importante destacar também que, no mês de julho de 2016, houve um incremento de reservação no CR Três Lagoas. Esse incremento refletiu em uma maior segurança ao sistema operacional, com relação à parada no horário de ponta da EET20, localizada no CR Portal, resultando, a partir deste mês, resultados mais satisfatórios quando comparados com os consumos dos meses anteriores, tanto em 2015, como nos meses anteriores a julho do próprio ano de 2016.

Da mesma forma, essa constatação pôde ser observada nos resultados obti-

dos em setembro de 2016 para todas as unidades operacionais avaliadas. Esse fato provavelmente ocorreu porque, em agosto de 2016, houve mais um incremento de reservação no CR Portal, tornando possível a parada de todas as elevatórias nas três horas relativas ao horário de ponta.

CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou apresentar, por meio de um estudo de caso, os resultados obtidos após a implementação de uma medida de eficiência energética aplicada ao SAA de Foz do Iguaçu. Essa medida referiu-se à parada no horário de ponta de algumas estações elevatórias de água bruta e tratada do sistema.

Os resultados apontaram que, para um período de oito meses, essa medida de eficiência energética resultou em uma economia de 86.351 kWh, representando uma economia de R\$118.300,87 para a Sanepar.

Como apresentado na introdução deste trabalho, esta é uma das muitas ações realizadas pela CICE da Unidade Regional de Foz Iguaçu (URFI). Trata-se de uma boa prática realizada pela Regional, na qual todos os colaboradores estão conscientes dos seus benefícios econômicos, ambientais e sociais.

É relevante ressaltar que a CICE está avançando nos estudos de melhoria da eficiência dos seus sistemas como, por exemplo, avaliando o uso de grupo de geradores no horário de ponta na ETA Vila C que, pelos estudos iniciais, possui um *payback* de 1,5 ano. Também será iniciado o diagnóstico hidroenergético de todas as elevatórias do SAA de Foz Iguaçu e Medianeira, que são os maiores sistemas operados pela URFI, com o objetivo de avaliar o rendimento e o consumo energético dos conjuntos motobombas. Após o diagnóstico, será verificada, por meio de uma avaliação de viabilidade econômica, a substituição de bombas e/ou motores ineficientes.

REFERÊNCIAS

- BALESTIERI, J.A.P, VILANOVA, M.R.N. Exploring de water-energy nexus in Brasil: The electricity use for water suppl. Revista Energy, n. 85, Abril 2015. p. 415-432.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2014. Brasília: MCIDADES, 2016.
- CICE – Comissão interna de conservação de energia. Disponível em: <m129606/ portal_cco/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=32>. Acesso em 25 ago 2016.
- COPEL – Companhia Paranaense de energia elétrica. Disponível em: <www.copel.com>. Acesso em 25 ago 2016.
- SANEPAR, Companhia de Saneamento do Paraná. Sistema corporativo de gestão industrial – SCI. Curitiba-PR. 2016.
- TSUTIYA, M.T. Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. São Paulo. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005.

INFORMAÇÕES SOBRE OS AUTORES PREMIADOS

Categoria "Mestrado ou Doutorado" do Prêmio Sanepar de
Tecnologias Sustentáveis – 1.º Lugar

ANDRÉ PEREIRA ROSA (autor principal), engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV e integrante da Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV. Tem trabalhado em pesquisas sobre o aproveitamento energético dos subprodutos do tratamento anaeróbio (lodo e biogás), assim como em pesquisas sobre resíduos agroindustriais e agropecuários. É autor de 24 artigos científicos apresentados em congressos nacionais e internacionais e 8 artigos científicos publicados em periódicos. Participou de vários projetos relacionados a saneamento e meio ambiente.
E-mail: andrerosa@ufv.br

Categoria “Mestrado ou Doutorado” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis – 2.º Lugar

BRUNO MIYAWAKI (autor principal), formado em Biotecnologia e Bioprocessos – UTP, Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais na Universidade Federal do Paraná (2012-2014). Iniciou, em 2009, atividades de pesquisa no Grupo Integrado de Aquicultura e Meio Ambiente (GIA) – UFPR, colaborando com o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia alternativa a partir da biomassa de microalgas. Tem experiência na área de tratamento de efluentes e emissões gasosas com ênfase em gases de escape e biogás. Atuou durante 3 anos como pesquisador no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS/UFPR) em parceria com as empresas Nilko Metalurgia Ltda. e a PSA Peugeot Citroën Brasil, trabalhando na geração de biocombustíveis através do cultivo de microalgas e tratamento de resíduos. Atualmente, é pesquisador do Instituto de Tecnologia Para o Desenvolvimento (LACTEC) onde desenvolve pesquisas com ênfase no tratamento de emissões e resíduos agroindustriais. E-mail: bruno.miyawaki@lactec.org.br

Categoria “Mestrado ou Doutorado” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis – 3.º Lugar

GUSTAVO MEIRELLES LIMA (autor principal), engenheiro Hídrico e Mestre em Engenharia de Energia pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2006-2013). Sócio-diretor de empresa de consultoria (2011-2014), na qual atuou em diversos projetos de geração de energia e eficiência energética. Vencedor do XXVII Prêmio Jovem Cientista – “Água: Desafios da Sociedade”, na Categoria Mestre e Doutor. Atualmente, é aluno de doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. E-mail: limameirelles@gmail.com

Categoria “Graduação ou Especialização” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis – 1.º Lugar

MAIQUEL AURILAMB (autor principal), engenheiro de Produção pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e técnico em Mecânica pela Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha. Atualmente, é Técnico em Mecânica da Comusa Serviços de Água e Esgoto de Novo Hamburgo. E-mail: mauri@comusa.rs.gov.br

Categoria “Graduação ou Especialização” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis – 2.º Lugar

BRUNA SCANDOLARA MAGNUS (autora principal), engenheira Sanitarista e Ambiental – UFSC (Brasil), Mestranda em Engenharia Ambiental – UFSC (Brasil). Teve dois trabalhos científicos premiados em 2.º lugar pelo Prêmio FAPEU de Divulgação Científica edições de 2013 e 2014. Autora de um trabalho completo publicado em anais de congressos e coautora em 6 trabalhos completos publicados em anais de congressos relacionados a saneamento e meio ambiente. E-mail: bruna.magnus@posgrad.ufsc.br

Categoria “Graduação ou Especialização” do Prêmio Sanepar de Tecnologias Sustentáveis – 3.º Lugar

KELLY BORNE (autora principal), graduanda em Engenharia Química pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA). É bolsista voluntária do programa SAVE (Sol, Água, Vida e Energia) e do projeto de extensão Green Park. E-mail: kelly.borne@aluno.unila.edu.br

Prêmio Inova Sanepar – 1.º Lugar

RODRIGO VOTRE (autor principal), tecnólogo em Automação Industrial – UTFPR, Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial – UFPR / STUTTGART, Pós graduado em Mecatrônica Industrial – PUCPR. É gestor da Equipe de Automação da Unidade de Serviço Manutenção Eletromecânica de Curitiba da SANEPAR. É autor de artigo publicado em revista especializada de Automação – INTECH, com assuntos relacionados a saneamento e meio ambiente. E-mail: rvotre@sanepar.com.br

Prêmio Inova Sanepar – 2.º Lugar

KATIA REGINA GARCIA DA SILVA (autora principal), engenheira Civil pela Universidade Positivo, Especialista em Planejamento e Gestão de Negócios pela FAE e Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental pela UFPR. E-mail: katiagarcia@sanepar.com.br

Prêmio Inova Sanepar – 3.º Lugar

VANDERLEI GONÇALVES DA SILVA (autor principal), formado em Sistemas de Informação, Pós-graduando em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações. É gestor do Centro de Controle Operacional da Unidade Regional de Foz do Iguaçu. E-mail: vanderleigs@sanepar.com.br

INFORMAÇÕES SOBRE OS MEMBROS DA COMISSÃO DE AVALIAÇÃO

BÁRBARA ZANICOTTI LEITE ROSS

Engenheira de Alimentos, Mestre em Tecnologia Química e Doutora Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR. É engenheira de pesquisa da SANEPAR desde 2009, autora (coautora) de 26 trabalhos científicos e quatro capítulos de livros. Coordena projetos de pesquisa relacionados ao tratamento de esgotos domésticos, controle e minimização de odor em estações de tratamento de esgotos, gerenciamento e disposição de espuma de reatores anaeróbios, melhorias operacionais para estações de tratamento de esgoto e água. E-mail: barbarazl@sanepar.com.br

CHARLES CARNEIRO

Engenheiro Agrônomo, Pós-doutor em Engenharia e Ciência da Água – UNESCO/IHE (Holanda), Doutor em Geologia Ambiental: Geoquímica de Águas – UFPR, Mestre em Ciência do Solo – UFPR e Aperfeiçoamento Técnico em Gestão Integrada de Lagos ILEC (Japão). É gerente da Unidade de Serviços de Esgoto na Sanepar, Professor de Mestrado no ISAE/FGV e Professor de pós-graduação na UFPR. Teve projetos premiados nacionalmente como: WWF Brasil, Von Martius, Expressão de Ecologia, Bramex Ambiental, PNQS/ABES e Congresso ABES. Autor (coautor) de mais de 60 contribuições científicas, 7 livros, 15 capítulos de livros e vários projetos relacionados a saneamento e meio ambiente. Também é membro da Câmara Técnica de Ciência e Tecnologia do CNRH. E-mail: charlesc@sanepar.com.br

DANIEL COSTA DOS SANTOS

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria (1988), Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1993), Doutor em Construção Civil e Estruturação Urbana pela Universidade de São Paulo (1998) e Pós-doutor em Saneamento Ambiental pelo Institute for Water Education, UNESCO IHE/ Holanda (2010). Atualmente, é professor associado da Universidade Federal do Paraná. Tem experiência na área de Saneamento Ambiental com ênfase no uso sustentável da água no meio urbano, nas instalações hidrossanitárias e nas soluções de saneamento para comunidades de interesse social. E-mail: dcsantos.dhs@gmail.com

FREDERICO FERREIRA DE VASCONCELOS

Engenheiro Civil com ênfase em Hidráulica pela UFMG, Especialista em Fontes Alternativas de Energia pela UFLA, Especialista em Engenharia Ambiental e MBA em Gestão de Negócios pelo IETEC-MG. É Assessor Técnico Sênior no Projeto de Cooperação Brasil-Alemanha em Eficiência Energética no Abastecimento de Água-ProEESA, a cargo da Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, e sócio-diretor da SCAI Automação Ltda. Elaborou centenas de projetos de eficiência energética, hidráulica, simulações e modelagens, telecontrole e automação para sistemas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, irrigação e recursos hídricos em todas as regiões do Brasil e, internacionalmente, em Honduras, Costa Rica, Venezuela e Argélia. Foi consultor da Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional (USAID) no programa Água e Energia, da Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA) no programa Iniciativa Global de Metano e da GIZ no Programa 4E Centro-América. Elaborou publicações na área de eficiência energética para o saneamento para The Alliance to Save Energy, BID e GIZ. E-mail: vasconcelos@akut-umwelt.de

GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI

Concluiu o doutorado e o mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), com especialização em Fotônica em Engenharia e em Automação em Processos de Petróleo e Gás Natural. Graduado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações, pela UTFPR, e em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. É gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Saneamento do Paraná. Desenvolve

projetos com foco em bioenergia e eficiência energética. Atua também nas áreas de instrumentação, metrologia e métodos quantitativos. É professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul. E-mail: gustavorcp@sanepar.com.br

LEANDRO ALBERTO NOVAK

Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica: Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos – UFPR, Mestre em Engenharia Mecânica: Manufatura – UTFPR. É coordenador da Unidade de Projetos Especiais na Sanepar. É professor do quadro próprio da UFPR do Departamento de Engenharia Mecânica, lecionando as disciplinas de Máquinas de Fluxo e Mecânica dos Fluidos. Tem patente de Biodigestor de fluxo ascendente com manta de lodo e selo hidráulico para tratamento de esgoto e projeto na Organização das Nações Unidas (ONU) para redução de CFC. Publicou artigos em revistas internacionais de matemática aplicada e mecânica dos fluidos computacional. Tem experiência profissional de mais de 20 anos em diversos setores da indústria, como petróleo e gás, plástico e termoplástico, e ainda nos setores alimentício e automobilístico, nas linhas leve e pesada, na construção civil e no saneamento. E-mail: leandron@sanepar.com.br; leandro.novak@ufpr.br

SERGIO MICHELOTTO BRAGA

Professor Adjunto da UFPR, lotado no Departamento de Hidráulica e Saneamento. Graduação em Engenharia Elétrica Industrial, com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações (CEFET/PR), Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR), Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (UFPR). Atua como pesquisador em projetos nas áreas de desenvolvimento de sensores eletrônicos para monitoramento meteorológico e hidroambiental, desenvolvimento de equipamentos para amostragem de águas superficiais, montagem e automação de sistemas de tratamento de águas residuárias, eficiência energética em redes de abastecimento de água, poluição difusa. E-mail: sergio.dhs.ufpr@gmail.com

MARCELO DALCUL DEPEXE

Engenheiro Civil – UFSM, Mestre em Engenharia de Produção – UFSC. É assessor da Diretoria de Operações, com atuação na Unidade de Serviços de Desenvolvimento Operacional da Sanepar. As principais áreas de atuação estão relacionadas ao controle e à gestão das perdas de água nos sistemas de distribuição, com pesquisa de novas tecnologias, equipamentos e processos voltados para melhoria da eficiência operacional. Autor (coautor) de mais de 30 artigos publicados em periódicos, congressos e seminários. Também é membro da Câmara Técnica de Desenvolvimento Operacional da AESBE – Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento. E-mail: mdepexe@sanepar.com.br