

AVALIAÇÃO DA COGERAÇÃO DE ENERGIA EM UNIDADE DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ITABUNA-BA

COGENERATION EVALUATION OF SEWAGE TREATMENT PLANT IN ITABUNA -BA

EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE COGENERACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE LA CLOACA EN ITABUNA - BA

Jefferson de Oliveira Cruz

Mestre em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Especialista em Economia de Empresas e Bacharel em Economia pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Técnico em Estatística e Processamento de Dados. Atualmente Coordenador da Assessoria de Planejamento e Expansão na Empresa Municipal de Águas e Saneamento S.A. (EMASA). Membro da Agencia de Regulação dos Serviços Públicos de Itabuna (ARSEPI) e do Conselho Municipal de Desenvolvimento Urbano Sustentável (COMDUS). Possui experiência na área Econômica, com ênfase em Economias Agrária e dos Recursos Naturais, Crescimento, Flutuações e Planejamento Econômico, e Metodologia e Técnica da Computação. Realiza estudos, pesquisas, análises, relatórios, pareceres, perícias, arbitragens, laudos, esquemas ou certificados sobre os assuntos compreendidos no campo profissional, inclusive por meio de planejamento, implantação, orientação, supervisão ou assistência dos trabalhos relativos às atividades econômicas ou financeiras, em empreendimentos públicos, privados ou mistos, ou por quaisquer outros meios que objetivem, técnica ou cientificamente, o aumento ou a conservação do rendimento econômico e dos recursos naturais de forma sustentável.

Angelo Marcos Santos de Lucena

Especialista em Planejamento, Gestão e Controle de Obras, pós graduando em Engenharia de Segurança do Trabalho, e Bacharel em Engenharia Civil pela Faculdade de Tecnologia e Ciências (FTC). Técnico em Edificações e Contabilidade. Atualmente Analista de Projetos do Departamento de Planejamento e Expansão na Empresa Municipal de Águas e Saneamento S.A. (EMASA). Membro do Conselho Municipal de Desenvolvimento Urbano Sustentável (COMDUS).

RESUMO

Com o aumento dos preços da energia no mundo, o aproveitamento energético de matérias orgânicas se traduz como alternativa; por ser renovável passível de ser armazenada, sua geração controlada poderá não somente fomentar o desenvolvimento de regiões, como alavancar empresas. Itabuna possui um índice no atendimento da coleta de esgoto na ordem de 72,50 % e de 14,90 % no tratamento, que pode comprometer a cogeração energética em uma Estação de Tratamento de esgoto (ETE). Avaliou-se o potencial de produção de biogás em uma ETE com vistas à conversão em energia elétrica, indicando alternativas de utilização e se recomendou o controle estatístico do processo (CEP) através da Carta de Controle. Estimou-se a capacidade de geração do biogás de um Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente (DAFA) com unidade de pós-tratamento do tipo Lodo Ativado com capacidade para atender 167.400 habitantes. A metodologia tem base em modelos matemáticos de dimensionamento, parâmetros sugeridos na literatura e pesquisas já elaboradas inerentes a cogeração conforme o projeto. A ETE produzirá com o DAFA cerca de 20,40 L hab⁻¹ d⁻¹ de biogás, sendo desta quantia 18,72 L hab⁻¹ d⁻¹ somente metano, considerando a purificação e a perda de potencial energético em 35,00 % com a dissolução de metano no efluente. O pós-tratamento por lodos ativados resultou na produção adicional de biogás ao DAFA de 1,19 L hab⁻¹ d⁻¹. O sistema como um todo resultou na produção de 19,91 L hab⁻¹ d⁻¹ de metano, atingindo um potencial energético de 2,38 W hab⁻¹ d⁻¹

suprindo parcialmente a ETE. O CEP demonstra ser um instrumento sensível para perceber possíveis instabilidades no sistema proposto.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Esgoto. Cogeração Energética. Controle Estatístico de Processos.

ABSTRACT

With energy price growth in the world, the energy use of organic materials translates as an alternative, renewable for being able to be stored, its subsidiary generation can not only promote the development of regions, as companies leverage. Itabuna has an index in the collection service in the order of 72.50 % and 14.90 % in the treatment, which can compromise energy cogeneration at sewage treatment plant (STP). We evaluated the biogas potential in a WWTP with a view to conversion into electrical energy, indicating alternatives of use and recommended the statistical process control (SPC) through the Control Chart. We estimated the capacity to generate biogas from a digester Anaerobic Ascending Flow (DAFA) with Activated Sludge type post-treatment unit with capacity for 167,400 inhabitants. The methodology is based on mathematical models of design, suggested parameters in the literature and research already produced inherent cogeneration as designed. The STP with DAFA will produce about 20.40 hab⁻¹ L⁻¹ d⁻¹ of biogas, this amount being 18.72 hab⁻¹ L⁻¹ d⁻¹ only methane, considering the purification and potential energy loss 35.00 % to the dissolution of methane in the effluent. The post-treatment with activated sludge resulting in additional production of biogas DAFA inhabitant 1.19 L⁻¹ d⁻¹. The system as a whole resulting in the production of 19.91 inhabitant L⁻¹ d⁻¹ methane, reaching a potential energy of 2.38 W hab⁻¹ d⁻¹ partially supplying the STP. The SPC is shown to be a sensitive tool to realize possible instabilities in the proposed system.

Keywords: Sewage Treatment Plant. Cogeneration Energy. Statistical Process Control.

RESUMEN

Con el aumento de los precios de la energía en el mundo, el uso energético de los materiales orgánicos se traduce como una alternativa, pues es renovable y se puede almacenar, su generación controlada no sólo puede promover el desarrollo de las regiones, sino también desarrollar las empresas. Itabuna tiene un índice en el tratamiento de aguas residuales en el orden de 72,50 % y 14,90 % en el tratamiento, que puede comprometer la cogeneración de energía en una Estación de tratamiento de aguas residuales (ETE). Se evaluó el potencial de producción de biogás en una ETE con miras a la conversión en energía eléctrica, indicando alternativas de uso y, se recomendó el control estadístico a través de la Carta de Control. Se estimó la capacidad de generación de biogás de un Digestor Anaerobio de Flujo Ascendente (DAFA) con post-tratamiento del tipo Lodo Activado con una capacidad de servicio para atender a 167.400 personas. La metodología se basa en modelos matemáticos para escalar, parámetros sugeridos en la literatura y en la investigación ya inherente a la cogeneración como el proyecto. El ETE, producirá con el DAFA alrededor 20,40 hab L⁻¹ d⁻¹ del biogás, siendo que de este importe 18,72 hab L⁻¹ d⁻¹ sólo metano, considerando la purificación y la pérdida del potencial energético en 35,00% con la disolución de metano en el efluente. El post-tratamiento con lodos activados resultó en la producción adicional de biogás al DAFA de 1,19 L hab⁻¹ d⁻¹. El sistema en su conjunto resultó en la producción de 19,91 L hab⁻¹ d⁻¹ de metano, alcanzando una energía potencial de 2,38 hab W⁻¹ d⁻¹ y, suministra parcialmente a ETE. El CEP demuestra ser un instrumento sensible para percibir posibles instabilidades en el sistema propuesto.

Palabras-clave: Estación de Tratamiento de Cloaca. Cogeneración Energética. Control Estadístico de Procesos.

INTRODUÇÃO

As energias renováveis vêm auferindo mais notoriedade com o passar dos tempos beneficiando de tal modo seu progresso, propagação e utilização, sendo uma opção integralmente capaz para a real conjuntura em que o mundo se encontra. Os conflitos do petróleo nas nações produtoras, deficiências e insuficiência do sistema de hidroelétricas, geraram intermitências no fornecimento dos serviços no Brasil, inviabilidade e risco de implementação de termelétricas, usinas nucleares e demais alternativas de energias não-limpas, pois o uso destas geram um grande impacto negativo ao meio ambiente repercutindo diretamente nos campos social e econômico (ICLEI, 2009; COSTA, 2006; CENBIO, 2008).

Entende-se que afluentes de esgoto em reatores anaeróbios produzem um resultado adequado em seu trato, pois além de mitigar a poluição e contaminação do ciclo, induz a produção do biogás, reaproveitado como fonte de energia térmica, mecânica e elétrica, tolerando ainda o resíduo final como biofertilizante (CETESB, 2010; CAMPOS, 1999).

Portanto, justifica-se o empenho para a elaboração de diversos projetos, para que com a utilização de biodigestores, se reduza a carga de matéria orgânica imposta ao meio ambiente. Assim, poder-se-á controlar a propagação de moscas e emissão de odores ofensivos e indesejáveis, reduzir a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) na atmosfera pela combustão, evidenciar a aplicação racional das sobras de natureza orgânica e, sobretudo, ofertar a destinação final mais ajustada a esses materiais (BRASIL, 2005; BRASIL, 2011; GARCEZ, 1969; CETESB, 2013).

O distúrbio no sistema ocorre quando a degeneração anaeróbia no biodigestor é influenciada negativamente e fica aquém do ideal. Com isso, a degradação dos substratos é diminuta. Involuntariamente a amplitude, os distúrbios do processo sempre devem ser brevemente diagnosticados e afastados (CAMPOS, 1999).

Os distúrbios persistem nas condições do meio em que as bactérias ou grupos de bactérias se ploriferam não são ideais. Em grande parte, os distúrbios se fazem perceber por uma elevação constante da concentração de ácidos graxos. Esse indício revela qualquer que seja a causa, o que se traduz pelo fato de as bactérias acetogênicas e metanogênicas serem mais compassivas as oscilações no meio que outros grupos de bactérias (CHERNICHARO, 2001).

Caso não ocorra intervenção, o progresso do distúrbio prosseguirá, a princípio com a elevação da concentração de ácidos graxos (inicialmente ácidos acético e propiônico, permanecendo a carga do processo, também ácidos isobutírico e isovalérico). Em seguida, o avanço continuado da relação ácidos orgânicos voláteis/taxa de alcalinidade (paralelamente ao aumento dos ácidos graxos), depois a diminuição do teor de metano e da produção de gás em alimentação constante, bem como o declínio do valor do pH (acidificação do processo). Por fim, o colapso generalizado da produção de gás (FARIA, 2012).

As prováveis razões para os distúrbios de processo são: indicações de deficiência (micronutrientes); oscilações de temperatura; substâncias inibidoras (amônia, desinfetantes, sulfeto de hidrogênio); deficiência no carregamento e sobrecarga do processo (CRESPO, 2005).

No processo para conversão do biogás em energia elétrica (cogeração), é essencial que aconteça uma queima controlada, na qual a alteração se processa pela mudança da energia química (rompimento das partículas do biogás) em energia térmica ou mecânica, e que ative um gerador que a converte em energia elétrica. Entre as tecnologias disponíveis no mercado para a conversão, os motores de combustão interna – Ciclo Otto e as microturbinas a gás são as mais utilizadas (ICLEI, 2010; COELHO *et. al*, 2006).

As principais particularidades construtivas e operacionais dos modelos de tratamento aplicados a esgotos predominantemente domésticos (residencial e comercial) enunciadas no estudo, estão apresentadas nos Quadros 1 e 2 indicadas por (VON SPERLING, 1996a).

Quadro 1 - Equipamentos mínimos necessários para as ETE's.

Sistemas de tratamento	Equipamento básico requerido
Tratamento preliminar	Grade; caixa de areia; medidor de vazão.
Tratamento primário	Removedor de lodo (sistemas maiores); misturadores nos digestores; equipamento para gás.
Lagoa facultativa	
Lagoa anaeróbia	Elevatória para recirculação do efluente (opcional)
Lagoa aerada facultativa	Aeradores
Lagoa de decantação	Aeradores
Reator anaeróbio de manta de lodo	
Lodos ativados convencional	Aeradores; elevatória de recirculação; removedores de lodo nos decantadores; removedores de lodo nos adensadores; misturadores nos digestores; equipamentos para gás; elevatória para retorno de sobrenadantes e drenados;
Lodos ativados (aeração prolongada)	Aeradores; elevatória de recirculação; removedores de lodo nos decantadores; removedores de lodo nos adensadores; elevatória para retorno de sobrenadantes e drenados.
Lodos ativados (fluxo intermitente)	Aeradores; removedores de lodo nos adensadores; elevatória para retorno de sobrenadantes e drenados.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996a).

Quadro 2 - Características dos sistemas de tratamento de esgoto.

Sistemas de tratamento	Requisitos			Custos de implantação (US\$.hab ⁻¹)
	Área (m ² .hab ⁻¹)	Potência (W.hab ⁻¹)	Volume de lodo produzido (L.hab ⁻¹ .d ⁻¹)	
Tratamento preliminar	<0,001	0,05		2,00 – 8,00
Tratamento primário	0,03 – 0,05	0,0		20,00 – 30,00
Lagoa facultativa	2,0 – 5,0	0,0	0,05 – 0,15	10,00 – 30,00
Lagoa anaeróbia	1,5 – 3,5	0,0	0,1 – 0,3	10,00 – 25,00
Lagoa aerada facultativa	0,25 – 0,5	1,0 – 1,7	0,08 – 0,22	10,00 – 25,00
Lagoa de decantação	0,2 – 0,5	1,0 – 1,7		10,00 – 25,00
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,05 – 0,10	0,0	0,2 – 0,6	20,00 – 40,00
Lodos ativados convencional	0,2 – 0,3	1,5 – 2,8	3,1 – 8,2	60,00 – 120,00
Lodos ativados (aeração prolongada)	0,25 – 0,35	2,5 – 4,0	3,3 – 5,6	40,00 – 80,00
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,2 – 0,3	1,5 – 4,0		50,00 – 80,00

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996a).

A Estatística é uma das ferramentas mais adequadas no controle e diagnóstico dos processos empresariais. É através dos conceitos de Estatística que se determina o tamanho da amostra adequada e o instrumento perfeito para resolver problemas específicos. Não obstante, os preceitos estatísticos promovem medidas de risco e precisão das avaliações em função dos parâmetros verdadeiros da população (MONTGOMERY, 2009).

Um produto ou serviço de qualidade é aquele que acata corretamente às especificações, alcançando o valor calculado com a menor oscilação possível ao redor dele. Cada produto porta uma quantidade de dados que, conjugados, delineiam sua adequação à utilização. Essas informações são comumente denominadas peculiaridades da qualidade ou indicadores de desempenho (AYRES, 2009).

O Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma ferramenta estatística aproveitada na produção que possibilita a diminuição sistemática da variabilidade nas especificações da qualidade de interesse, promovendo o aperfeiçoamento da qualidade intrínseca, da produção, da segurança e dos custos (MONTGOMERY, 2009).

O objetivo do CEP, no monitoramento da amostragem, realizado no decorrer do processo, é averiguar aspectos de causas especiais, eventuais ao processo e que podem causar dano a qualidade do produto produzido (SAMOHYL, 2009).

O CEP estabelece um panorama do processo, detectando sua variabilidade e permitindo o controle dessa oscilação ao longo do tempo por meio da coleta de informações frequentes, verificação e cerco de prováveis causas especiais que estejam promovendo a instabilidade do sistema (MONTGOMERY, 2009).

O CEP permite o acompanhamento das especificações de relevância, resguardando que elas irão se estabelecer dentro de limites calculados e apontando quando devem ser tomadas providências de correção e aperfeiçoamento para impedir a adição de matéria-prima e mão de obra a um produto defeituoso (MONTGOMERY, 2009; ISO 8258, 1991).

Logo, ele possibilita às empresas o arcabouço para aperfeiçoar a qualidade de produtos e serviços e, concomitantemente, diminuir de maneira preponderante o custo da baixa qualidade (VIEIRA, 1999).

Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás em uma unidade de tratamento de esgoto com vistas à conversão em energia elétrica, na cidade de Itabuna, na Bahia.

MATERIAIS E MÉTODO

O local de aplicação desta pesquisa foi no município de Itabuna-BA (Figura 1). Localizado, aproximadamente entre os meridianos 39° 18' W e os paralelos e 14° 48' S, na zona fisiográfica denominada região cacauera da Bahia (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ITABUNA, 2013), com área territorial de 443.198 km² e população de 204.667 habitantes (IBGE, 2010).

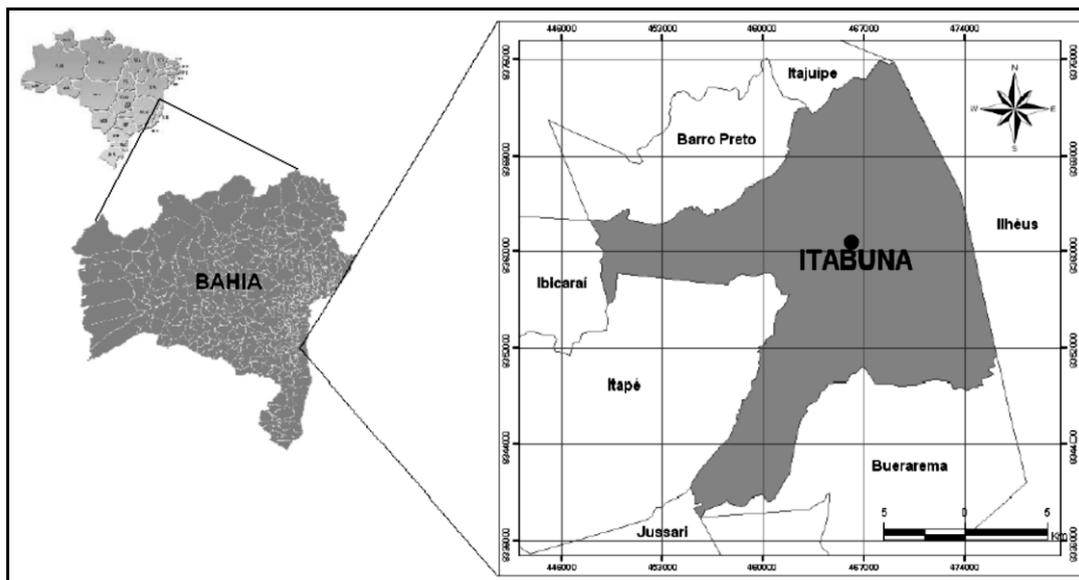


Figura 1 – Localização do município de Itabuna – BA. Fonte: BAHIA, 2001.

O tipo da unidade utilizada no estudo é um sistema de pré-tratamento com digestores anaeróbios de fluxo ascendente – DAFA's seguidos da tecnologia de lodos ativados com aeração prolongada (Figura 2), confirmada por Crespo (2005), julgada a mais adequada às necessidades da concessionária local, a Empresa Municipal de Águas e Saneamento S/A (EMASA).

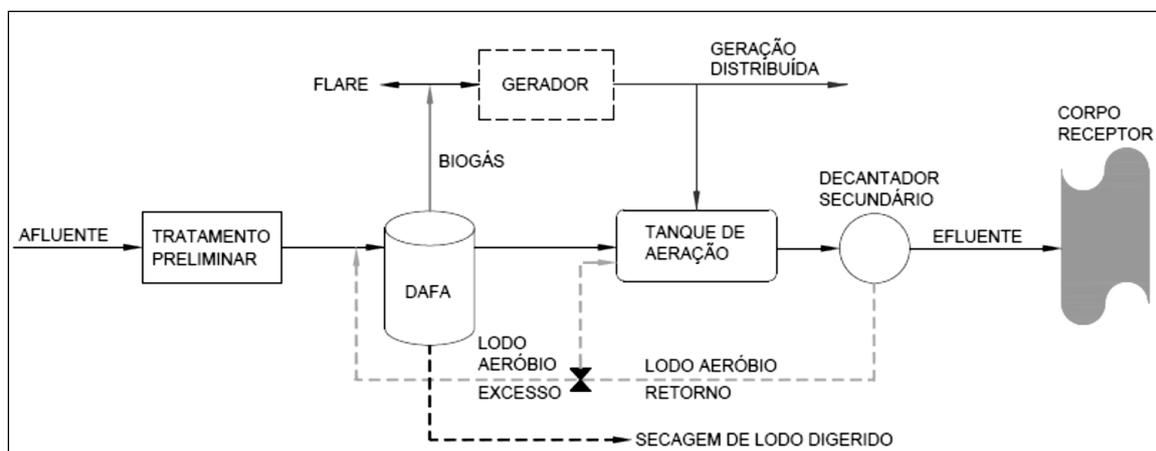


Figura 2 - Layout do sistema anaeróbio-aeróbio com pré-tratamento. Fonte: Adaptado do Crespo (2005).

Para realização desta pesquisa a técnica escolhida foi o estudo de caso, tendo como elemento central a avaliação do potencial da capacidade de cogeração energética pela unidade de tratamento (ETE Vertente Leste) da EMASA, em Itabuna-Ba (LAKATOS; MARCONI, 2003).

Nesse aspecto, ressalta-se que o trabalho foi concentrado em um estudo de natureza descritiva e dedutiva. Conforme Marconi e Lakatos (1999), a pesquisa descritiva se caracteriza por registrar, observar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los. Para os autores, o método dedutivo caracteriza-se por partir de concepções gerais e aplicá-las a nível específico em determinado estudo.

Para a elaboração da pesquisa, buscou-se uma revisão bibliográfica fundamentada em acervos literários, apostilas, dissertações de mestrado, indicadores do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS), trabalhos científicos apresentados em congressos nacionais e internacionais, estudos e pesquisas feitas por empresas ligadas ao tema e também os registros de auto-monitoramento da concessionária.

Na operacionalização dos dados, para o estudo da população, utilizaram-se os dados da EMASA equivalente à Vertente Leste com delimitação de contorno de escoamento e de sub-bacias e, de bacias de esgotamento resultante das condições topográficas por meio de levantamento aerofotogramétrico da Cidade, contemplando 34 bairros.

Para a quantificação do afluente, primeiramente, estimou-se a contribuição média doméstica e comercial e da concentração de carga orgânica do esgoto afluente, de acordo von Sperling (1996a) por meio da equação $Q_{méd} = \frac{Q_{pc} \cdot Cr}{1000}$ ($m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), na qual, $Q_{méd}$ é a vazão doméstica média per capita de esgotos ($m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), Q_{pc} é a quota *per capita* de água ($L \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), e Cr é o coeficiente de retorno, conforme NBR 9649 (ABNT, 1986).

Para determinação da concentração de DBO_5 do esgoto doméstico afluente, foi adotado como base o valor de contribuição de $54g \text{ DBO}_5 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, segundo a NBR 12.209

(ABNT, 1992), conforme equação $C_{DBO_5AFL} = \frac{Porção}{Q_{méd}}$ ($mg \text{ L}^{-1}$), em que, *Porção* é a carga de DBO_5 afluente ($g \text{ d}^{-1}$), C_{DBO_5AFL} é a concentração média de DBO_5 do esgoto afluente ($g \text{ m}^3 = mg \text{ L}^{-1}$), e $Q_{méd}$ é a vazão média doméstica de esgotos ($m^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

Adota-se 0,47 para a relação $DBO_5 \text{ DQO}^{-1}$ afluente, atribuída por Carvalho *et al.* (1993), conforme equação $DQO_{aficiente} = C_{DBO_5AFL} \cdot (DBO_5 \cdot DQO^{-1})^{-1}$ ($mg \text{ L}^{-1}$), sendo, $DQO_{aficiente}$ a concentração de DQO afluente ($mg \text{ L}^{-1}$), C_{DBO_5AFL} a concentração média de DBO_5 do esgoto afluente ($g.m^3 = mg.L^{-1}$), DBO_5 a Demanda Bioquímica de Oxigênio com conteúdo médio de

oxigênio (mg L^{-1}) da água de diluição ao fim de 5 dias de incubação, e DQO a Demanda Química de Oxigênio.

O resultado da DQO efluente depende especificamente da eficiência do reator, conforme Chernicharo *et al.* (1999) na equação $E_{DQO} = 100 \cdot (1 - 0,73 \cdot TDH^{-0,60})$, na qual, E_{DQO} é a eficiência do reator DAFA em termos de remoção de DQO (%), TDH é o tempo de detenção hidráulica (h); Chernicharo *et al.* (1999) recomendam a utilização de 8 horas, 0,73 é a constante empírica (coeficiente do sistema de remoção) e 0,60 é a constante empírica (coeficiente do meio suporte para velocidades ascensionais).

Em unidades de pós-tratamento de tanques sépticos as eficiências de remoção de DBO variam de 73,00 a 95,00 %. Para tanto, é primordial que seja garantida a manutenção de baixas velocidades ascensionais ($0,50$ a $0,70 \text{ m h}^{-1}$ para vazão média) nas áreas destinadas à digestão e decantação do reator, visando à retenção de biomassa e o equilíbrio do sistema (CHERNICHARO, 2001).

Considerou-se a taxa média de geração de $0,17 \text{ m}^3$ de biogás por m^3 de esgoto tratado, segundo Faria (2012), com a vazão volumétrica de esgoto tratado, foi possível se estimar a produção média de biogás, através da equação $Q_{\text{biogás}} = Q_{\text{esgtrat}} \cdot tx_{bg}$ ($\text{m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ou $\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), em que, $Q_{\text{biogás}}$ é a produção média de biogás ($\text{m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), Q_{esgtrat} é a vazão volumétrica de esgoto tratado, e tx_{bg} é a taxa média de geração de biogás.

Para avaliar a fração de metano no biogás calculado, primeiramente, utilizou-se a equação (CHERNICHARO *et al.* 1999) convertendo a DQO em CH_4 , $DQO_{\text{CH}_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y \cdot Q \cdot S_0$ ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), sendo, DQO_{CH_4} a carga de DQO removida no reator e convertida em metano ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ had}^{-1} \text{ d}^{-1}$), S_0 a concentração de DQO afluente ($\text{g/m}^3 = \text{mg L}^{-1}$), S a concentração de DQO efluente ($\text{g/m}^3 = \text{mg L}^{-1}$), Q a vazão de esgoto afluente ($\text{m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), Y é o coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO ($0,11$ a $0,23 \text{ kgDQO}_{\text{lodo}} \text{ kgDQO}_{\text{aplicada}}^{-1}$). O Coeficiente de Produção de Sólidos Suspensos Totais (Y) refere-se à formação de partículas. Segundo Chernicharo *et al.* (1999), o valor de Y de acordo os estudos para processos anaeróbio é de $0,20 \text{ kg}$ de DQO de lodo por kg de DQO aplicada.

Ainda de acordo a metodologia de Chernicharo *et al.* (1999), nesta próxima etapa,

apurou-se a DQO correspondente a 1 mol de CH_4 pela equação $K_{(T)} = \frac{P \cdot K}{R \cdot (273 + T)}$ (gDQ

$\text{CH}_4 \text{ L}^{-1}$), onde, $K_{(T)}$ é o fator de correção para a temperatura operacional no DAFA ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ L}^{-1}$), P é a pressão atmosférica (1 atm), K é a DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (64 gDQO mol^{-1}), R é a constante universal dos gases ($0,08206 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T é a temperatura operacional do reator ($^{\circ}\text{C}$). R é independente do estado e seu valor é constante para qualquer das transformações. O valor de R foi obtido da seguinte forma: O volume ocupado por um gás nas condições normais de pressão (1 atm) e temperatura ($0^{\circ}\text{C} = 273,15 \text{ K}$), por qualquer das leis gerais de estado dos gases depende apenas do número de moles. Para um gás que obedeça às leis gerais, este volume é igual a: $V = 22,414 n$ litros, em que 22,414 litros é o volume molar nas condições normais de pressão e temperatura. Resolvendo-se a equação geral dos gases para 1 mol, nestas condições, tem-se: $R = (1 \text{ atm } 22,41 \text{ L}) (1 \text{ mol } 273,15 \text{ K})^{-1} = 0,08206 (\text{atm L})(\text{mol K})^{-1}$.

Finalmente, parte da DQO é absorvida pela sintetização celular impulsionando uma ampliação da biomassa (lodo), cujo valor foi obtido por meio do produto de $Y.Q.S_o$. Com o resultado, calculou-se o volume de metano produzido por meio da equação

$$Q_{\text{CH}_4} = \frac{DQO_{\text{CH}_4}}{K_{(T)}} (\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}),$$

na qual, Q_{CH_4} é a produção volumétrica de metano per capita ($\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), DQO_{CH_4} é a carga de DQO convertida em metano ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), $K_{(T)}$ é o fator de correção para a temperatura operacional do reator ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ L}^{-1}$). O valor adotado para a temperatura foi de 25°C , pouco superior à média anual de $23,6^{\circ}\text{C}$ (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ITABUNA, 2013).

O cálculo do potencial de produção volumétrica de metano líquido $Q_{\text{CH}_4\text{líquido}}$ leva em consideração a perda de metano dissolvido, conforme a equação $Q_{\text{CH}_4\text{líquido}} = (1 - \% \text{CH}_{4\text{dissolvido}}) \cdot Q_{\text{CH}_4}$ ($\text{L}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), sendo que $Q_{\text{CH}_4\text{líquido}}$ é a produção volumétrica de metano per capita ($\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), $\% \text{CH}_{4\text{dissolvido}}$ o percentual médio das perdas práticas de metano dissolvido no efluente, e Q_{CH_4} é a produção volumétrica de metano per capita ($\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Segundo Chernicharo *et al.* (2001), as perdas práticas de metano nos DAFA's podem variar de 20,00 % a 50,00 % motivadas pela saída de metano dissolvido no efluente e também como resultado da transferência deste gás da superfície de água no reator para a atmosfera, para esta pesquisa utilizou-se o percentual médio de 35,00 %.

A produção volumétrica de metano per capita ($\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$) ($Q_{\text{CH}_4\text{líquido}}$), representado 90,00 % purificado, conforme Pecora (2006), já calculada, somado a 10,00 % deste valor,

compõe a produção total de biogás no DAFA, de acordo a equação $Q_{biogásDAFA} = (Q_{CH_4líquido} \cdot 100) \cdot 90^{-1} (L_{biogás} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1})$, em que, $Q_{biogásDAFA}$ é a produção volumétrica total de biogás *per capita* no DAFA ($L \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), $Q_{CH_4líquido}$ é a produção volumétrica de metano *per capita* ($L \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), 10,00 % é o percentual complementar de rejeitos na composição volumétrica de biogás total purificado *per capita* no DAFA ($L \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Por meio das características do efluente do reator, verificou-se a produção de sólidos provenientes do sistema de lodo ativado, estimando a carga de lodo excedente *per capita* entre 8 a 14 $gSS.hab^{-1} d^{-1}$ direcionado ao DAFA pela linha de recirculação e o acréscimo da produção de biogás, utilizando a metodologia de Von Sperling (1997).

A disponibilidade energética *per capita* a partir da produção de biogás no DAFA, considerando também o acréscimo originário da digestão do lodo aeróbio excedente do sistema de lodo ativado, foi determinada pela equação $Q_{biogásLA} = Q_{lodoexc} \cdot 0,76 \cdot E_{SV} \cdot Q_{DAbiogás} (gSV.hab^{-1}.d^{-1})$, onde, $Q_{biogásLA}$ é a geração adicional de biogás a partir do lodo aeróbio excedente ($L_{biogás} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), $Q_{lodoexc}$ é a produção média *per capita* de lodo aeróbio excedente (VON SPERLING, 1997) ($gSS \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), 0,76 é o coeficiente médio pela relação de Sólidos Suspensos Voláteis por Sólidos Suspensos (VON SPERLING, 1996b), E_{SV} é o coeficiente de 0,25 determinado para a eficiência da digestão dos Sólidos Voláteis do lodo anaeróbio no DAFA (VON SPERLING, 1996b), e $Q_{DAbiogás}$ é o fator de 0,8 para produção de biogás pela digestão anaeróbia de lodo, (Chernicharo et al., 2001) ($L_{biogás} gSV^{-1}$).

De acordo com a *International Council for Local Environmental Initiatives* (ICLEI) (2010), é possível calcular o potencial elétrico do biogás a partir do volume de esgoto tratado por dia. Segundo Pecora (2006), o poder calorífico inferior do biogás a considerar

é $8.200 \text{ kcal m}^{-3}$ biogás, $PE = \frac{Q_{biogásútil} \cdot 8200 \cdot 0,30 \cdot 4,1868}{86400} (W \text{ hab}^{-1})$, sendo, PE a potência

elétrica ($W \text{ hab}^{-1}$); $Q_{biogásútil}$ a produção volumétrica *per capita* de biogás purificado no DAFA ($Q_{biogásDAFA}$) somado a geração adicional de biogás a partir do lodo aeróbio excedente ($Q_{biogásLA}$) ($L_{biogás} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), 8200 o poder calorífico inferior do biogás purificado (COELHO et al., 2006) ($kcal \text{ m}^{-3}$ biogás), 0,30 o percentual médio da eficiência dos motores para conversão (COELHO et al., 2006), 4,1868 o fator de conversão “Kcal” (quilocalorias) para “KJ” (quilojoules).

De acordo com a metodologia revisada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PNUD, 2010; ALVES, 1998), a quantidade de lançamentos anuais de CH₄ na atmosfera no Município proveniente do tratamento anaeróbio de águas residuárias (domésticas e comerciais) pode ser estimada através da equação $E = Pop_{ETE} \cdot taxaDBO_5 \cdot FET \cdot MFEM - R$, em que, E é a emissão de metano (Gg CH₄ ano⁻¹), Pop_{ETE} é a população estimada para a ETE em 2030 (habitantes), $taxaDBO_5$ é a taxa de geração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (no Brasil é de 18,250 Kg DBO₅ hab⁻¹ ano⁻¹ (ALVES, 1998)), FET é a fração de esgoto tratado (fração adimensional, entre 10,00 % a 20,00 %), FCM é o fator de correção de metano (fração adimensional, entre 80,00 % a 90,00 %), $MFEM$ é o máximo fator de emissão de metano (parte adimensional ou gCH₄ gDBO₅⁻¹, 25,00 %), e R é a quantidade de metano recuperado (gCH₄ ano⁻¹, de acordo o Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos o valor é considerado insignificante, por isso, desconsidera-se essa variável). Os valores correspondentes adotados para as estimativas da fração de esgoto tratado (FET) anaerobiamente e o fator de correção de metano (FCM) foram indicados pelo IPCC.

As principais particularidades dos modelos de tratamento aplicados a esgotos predominantemente domésticos (residencial e comercial) enunciadas no estudo estão apresentadas no estudo de Von Sperling (1996a).

Para validar a proposta de implementação do CEP, definiu-se um cenário com dados hipotéticos, a partir do resultado do potencial energético calculado no estudo, em um período de coleta com a definição da frequência de amostragem e entrada dos dados. De posse das informações, determinou-se o tipo da Carta de Controle que foi realizado o cálculo dos limites de controle para sua utilização plena de acordo com Montgomery (2009), Samohyl (2009), Branco, Epprecht e Carpinetti (2008). Em seguida identificaram-se as variabilidades no processo para atender às possíveis incidências de causas comuns e/ou especiais. Por fim, fez-se uso da norma ISO 8258 (1991) como base de critérios para tomada de decisão na carta de controle proposta.

Empregaram-se as cartas de controle X_{ind} e R_m para o monitoramento do processo de conversão energética do biogás. A primeira teve como foco observar as medidas individuais da resposta do processo e a segunda foi determinada como sendo a diferença

(em valores absolutos) entre amostras individuais sucessivas para atender à variabilidade do processo (MONTGOMERY, 2009).

O processo em estudo possui peculiaridades de qualidade de importância (X_i) para ser monitorada com distribuição normal com média μ e desvio padrão σ (MONTGOMERY, 2009; SAMOHYL, 2009).

As variáveis do estudo ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) são amostras provenientes das observações particulares, ou seja, amostras de tamanho $n=1$ de distribuição com média μ e desvio padrão $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sigma$ porque $n=1$, assim, $\bar{X} \sim N\left(\mu, \sigma_{\bar{x}}\right) = N(\mu, \sigma)$. Logo, com os atributos da distribuição normal, pode-se entender que há uma probabilidade igual a $(1 - \alpha)$ de que a média do processo permaneça entre $\mu - Z_{\frac{\alpha}{2}}\sigma$ e $\mu + Z_{\frac{\alpha}{2}}\sigma$, ou seja, no intervalo de

confiança $P\left(\mu - Z_{\frac{\alpha}{2}}\sigma < \bar{X} < \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}}\sigma\right) = (1 - \alpha)$ (SAMOHYL, 2009).

Aplicou-se o preceito 3σ , que versa em praticar $Z_{\frac{\alpha}{2}} = 3$. Com este propósito, quando $k=3$, recomenda que 99,73% das observações da carta de controle estão no espaço $\mu \pm 3\sigma$, ou seja, $P\left(\mu - 3\sigma < \bar{X} < \mu + 3\sigma\right) = 0,9973$ que é a probabilidade de acontecimento das observações no intervalo. Com o sistema 3σ , pode-se perceber que a probabilidade do gráfico enunciar um falso alarme é igual a, $(1 - \alpha) = (1 - 0,9973) = 0,0027$, ou seja, 0,027 % que é a expectativa de evento de valores fora do intervalo de $(\mu \pm 3\sigma)$ estimado (BRANCO; EPPRECHT; CARPINETTI, 2009).

Fez-se uso de $\hat{\mu} = \bar{X}$ e $\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}_m}{D_2}$ como estimadores de μ e σ respectivamente, assim, a carta de controle para medidas individuais X_{ind} fica determinada com os atributos do $LSC_x = \bar{X} + \frac{3}{D_2}\bar{R}_m$, $LM_x = \bar{X}$ e $LIC_x = \bar{X} - \frac{3}{D_2}\bar{R}_m$. Na qual, D_2 é uma constante tabelada em função da amplitude móvel utilizada no Limite Superior (LSC) e Inferior de Controle (LIC), o Limite Médio (LM) concebe o valor médio da variável de qualidade em

estudo relativo ao estado sob controle em que $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$, e $\bar{R}_m = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} R_{mi}}{n-1}$, que é a amplitude móvel média em função da amplitude móvel individual utilizada (MONTGOMERY, 2009).

A carta de controle para a amplitude móvel (R_m) utilizada no estudo foi determinada $LSC_{RM} = D_4 \bar{R}_m$, $LM_{RM} = \bar{R}_m$ e $LIC_{RM} = D_3 \bar{R}_m$, em que D_3 e D_4 são constantes tabeladas em relação à amplitude móvel (MONTGOMERY, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A EMASA realizou um estudo populacional na cidade, utilizando como parâmetro os dados do Censo de 2010, indicando uma estimativa de 300.000 habitantes para o ano de 2030. Considerando as proporcionalidades de áreas definidas em projeto, o recorte populacional do presente estudo é o de 167.400 habitantes referente à Vertente Leste.

Durante a elaboração do Programa de Modernização do Setor Saneamento –PMSS, a EMASA elaborou estudos de demanda a partir dos dados de consumos medidos e do total de ligações de três setores de abastecimento de água da cidade, chegando a um consumo *per capita* de 139 L hab⁻¹ d⁻¹. Porém, para este trabalho foi adotado um consumo médio majorado de 150 L hab⁻¹ d⁻¹, de acordo Von Sperling (1996a).

Foi atribuído o escore de 0,8 (relação esgoto-água) para o coeficiente de retorno por não haver resultados obtidos em campo, conforme a NBR 9.649 (ABNT, 1986) recomenda. Assim, a vazão calculada *per capita* média de esgotos que a ETE pode tratar é de 0,120 m³ hab⁻¹ d⁻¹ ou 120 L hab⁻¹ dia⁻¹, equivalendo a 232,5 L.s⁻¹ a vazão pela população total.

Dentro deste cenário, com o indicativo da população e com resultado da vazão, esta unidade de tratamento de esgoto, conforme a Resolução N° 377 (CONAMA, 2006), em seu inciso IV, é classificada como sendo de médio porte, em função da vazão nominal de projeto ser maior que 50 L s⁻¹ e menor ou igual a 400 L s⁻¹, ou com capacidade para atendimento superior a 30.000 e inferior a 250.000 habitantes.

Por conseguinte, associado à DBO com a matéria orgânica presente no resíduo, vinculada à população contribuinte de esgoto, a razão demonstrada, determinou que,

através da vazão identificada, o valor correspondente a concentração da carga orgânica do esgoto afluente é de 450 mg L^{-1} . Pela porção encontrada da carga orgânica, considera-se um resíduo concentrado, convencionado em diretrizes normativas como “esgoto forte” (METCALF; EDDY, 1981; USEPA, 1994).

Adotou-se para a proporção de DBO_5 na DQO o valor empírico proporcional de 0,47 para esgoto doméstico, conforme sugere o estudo realizado por Carvalho *et al.* (1993). Desta maneira, tem-se então 957 mg L^{-1} de concentração da DQO afluente.

O valor consoante à remoção da DQO afluente foi resultante da eficiência do reator DAFA, determinada e aplicada ao Tempo de Detenção Hidráulica de 8 horas, com o objetivo de evitar arraste de sólidos.

Sendo assim, a eficiência do reator é de 79,00 %, ou seja, $200,72 \text{ mg L}^{-1}$ de DQO efluente. Esse valor de remoção de DQO afluente está superior ao que se espera para reatores anaeróbios, pois Chernicharo (2001) considera o sistema anaeróbio eficiente quando a remoção de matéria orgânica for superior a 65,00 % para o tratamento de águas residuárias.

A produção média de biogás encontrada foi de $20,40 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, e corrobora com Aisse (1999), pois, para processos anaeróbios, a produção de biogás pode variar predominantemente, na faixa de 5 a $20 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}$ ou ainda 200 litros por kg de DQO removida.

Na concentração de metano, primeiramente, calculou-se a carga de DQO convertida em metano ($67,83 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), a sua correspondente a 1 mol ($2,62 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4} \text{ L}^{-1}$), em níveis normais de temperatura, pressão e condições normais de operação do reator. Assim, a produção de metano calculada *per capita* medido foi de $25,92 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, e, considerando as perdas de 35,00 % da produção volumétrica, a geração de metano líquido encontrada foi de $16,85 \text{ L}_{\text{CH}_4} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Por conseguinte, fez-se necessário eliminar as impurezas do metano com a finalidade de conversão em energia, e foi alcançado um resultado de $18,72 \text{ L}_{\text{biogás}} \text{ hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Em seguida, avaliou-se também a geração adicional de biogás purificado a partir do lodo aeróbio excedente na linha de recirculação ($1,19 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), totalizando $19,91 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Finalmente, de posse dos resultados da produção volumétrica de biogás somados das unidades (DAFA e Lodo Ativado), estimou-se o potencial energético no sistema ($2,38 \text{ W hab}^{-1}$).

No que se diz respeito às alternativas do reaproveitamento da energia elétrica apurada na unidade projetada, em princípio, foram obtidos como avaliação o valor de 61,10 tCH₄ ano⁻¹ proveniente da degradação anaeróbia para o município de Itabuna, utilizando o número de habitantes projetado para a ETE em 2030 (fim de plano). A estimativa representa um total considerado de gás nocivo que não sendo processado é lançado direto à atmosfera.

Por consecutivo, após a conversão deste gás em energia elétrica, observou-se que o seu potencial não daria para suprir a demanda energética total da própria ETE, ou seja, autossuficiente, pois, seria necessário 3,55 W hab⁻¹ considerando as etapas de tratamento preliminar, tratamento primário, DAFA e lodo ativado. Porém, com o potencial energético de 2,38 W hab⁻¹ calculado, pode ser destinado à aplicação nas seguintes etapas: tratamento preliminar, tratamento primário e no DAFA conjuntamente; ou no processo de lodos ativados (aeração prolongada) separadamente. Por outro lado, também, poderá ser aplicado na iluminação interna na área da ETE ou em seu entorno nas unidades residenciais e comerciais.

No que se refere ao monitoramento do resultado calculado, após analisar os dados hipotéticos idealizados na Tabela 1, para validar a proposta de utilização do CEP tanto a Carta Xind (Figura 2) quanto a Carta RM (Figura 3), expõem diversos valores além dos limites de controle, mostrando que ocorreram causas especiais ao longo do período monitorado, para serem tomadas ações corretivas e o processo voltar estar sob controle estatístico.

Tabela 1. Dados hipotéticos coletados da potência elétrica convertida do biogás gerado na ETE Vertente Leste, Itabuna - BA. para construção da Carta de Controle Xind e Rm.

DATA	HORA	P. E.	HORA	P. E.
dd/mm/aaaa	01:00:00	2,350	13:00:00	2,3600
	02:00:00	2,360	14:00:00	2,3550
	03:00:00	2,355	15:00:00	2,3500
	04:00:00	2,365	16:00:00	2,3450
	05:00:00	2,350	17:00:00	2,3400
	06:00:00	2,360	18:00:00	2,3350
	07:00:00	2,365	19:00:00	2,3740
	08:00:00	2,400	20:00:00	2,3730
	09:00:00	2,385	21:00:00	2,3870
	10:00:00	2,380	22:00:00	2,3865
	11:00:00	2,375	23:00:00	2,3780
	12:00:00	2,365	00:00:00	2,3830

Fonte: Dados hipotéticos adaptados pelo autor.

A identificação na Figura 2 e 3 de oscilações referentes às causas especiais encontradas conforme os padrões de referência concernentes às configurações não-aleatórias, projetados a partir dos atributos da distribuição normal, permite perceber: sequência (as amostras das primeiras sete horas estão fora de controle formando um padrão de seqüência consecutiva em apenas um dos lados, abaixo do *LIC*, que estão vinculadas a alterações expressivas no processo, originadas por matéria-prima, troca de equipamentos, mudança de procedimentos operacionais, etc.); pontos fora dos limites de controle (na oitava hora, a amostra observada ficou acima do *LSC*, que neste caso, as causas especiais podem estar ligadas a informações produzidas por procedimentos incorretos de coleta de dados ou equipamentos descalibrados); tendência (percebida uma tendência nas amostras das 9 h às 18 h, descendentes, que revela como causas desse desenho a deterioração de ferramentas ou alteração nas condições ambientais); aproximação dos limites de controle (nas amostras das 19 h às 22 h são eventualmente típicas de relevantes e repetidos ajustes no processo de acordo com as causas comuns, e não as especiais); aproximação da média (nas amostras das 9 h às 11 h, bem como, nas da 23 h e 00 h, revela que configuração dos procedimentos estão sob controle); periodicidade (detectável ao longo da monitoração de todo período observado, demonstrando que as amostras estão

distribuídas no gráfico como uma curva que apresenta uma tendência alternada para cima e para baixo podendo ser associada, por exemplo, à rotatividade de operadores).

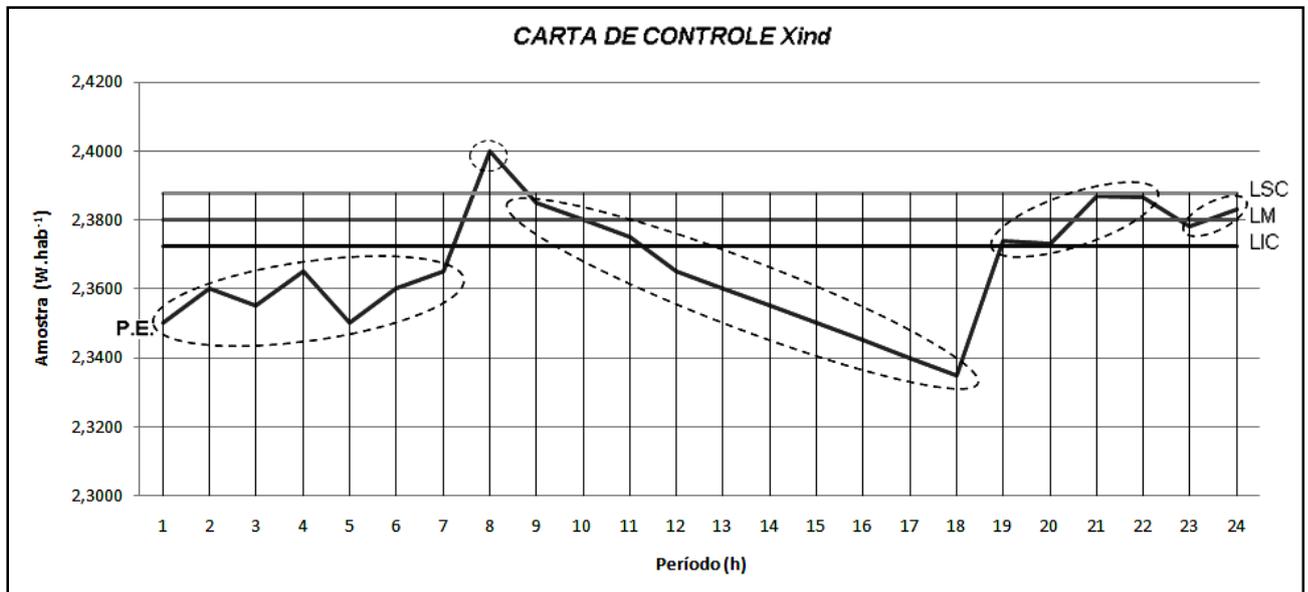


Figura 2 – Carta de Controle Individual para valores hipotéticos de referência do potencial energético convertido do biogás gerado na ETE Vertente Leste, Itabuna (BA).

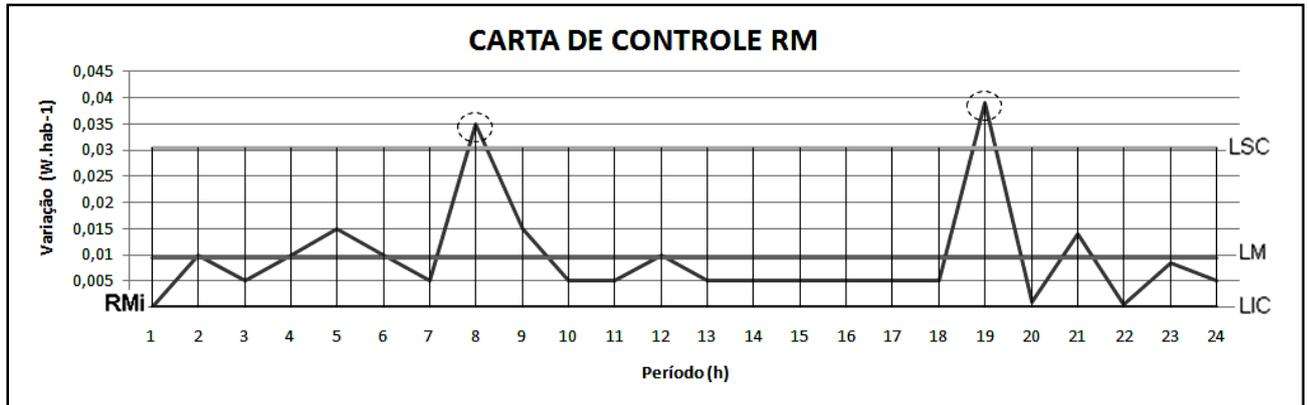


Figura 3 – Carta de Controle Amplitude Móvel para valores hipotéticos de referência do potencial energético convertido do biogás gerado na ETE Vertente Leste, Itabuna (BA).

CONCLUSÃO

O sistema de tratamento proposto no estudo é uma alternativa com diversas vantagens, como redução de área, melhor qualidade do efluente tratado, não necessitando de decantador primário, e o lodo aeróbio são retornados ao DAFA para

digestão, onde atinge índices satisfatórios dentro dos parâmetros recomendados pelos órgãos ambientais e contidos nas Resoluções 357 (CONAMA, 2005) e 430 (CONAMA, 2011).

Foi demonstrado também por meio dos dados analisados que, com a implantação da tecnologia de conversão do biogás a partir de esgotos doméstico (residencial e comercial) em energia elétrica, pode-se evitar de forma significativa a emissão de metano na atmosfera.

Cabe destacar que a proposição do presente trabalho não foi esgotar as possibilidades de análise e os impactos ambientais, pois há sistemas de utilização do biogás que na coparticipação da produção de energia, utilizam caldeiras para queima do lodo desidratado, o que emitem particulados (CO₂). Contudo, são sustentáveis quanto à contaminação de lençóis, porém impactantes na atmosfera.

Conclui-se que a produção de energia a partir de subprodutos do tratamento de esgotos é relevante, sustentando benefícios econômicos e ambientais, entretanto, é importante ressaltar que os valores encontrados são estimativas que podem variar em função do controle das variáveis do projeto e da tecnologia embarcada.

Também, não obstante, fica evidente que as Cartas de Controle empregadas, monitoraram de forma ajustada e eficaz os dados da produção, verificando o desempenho do processo, contribuindo na eliminação de causas especiais e cercando as causas comuns, deixando o processo sob controle, para um posterior aperfeiçoamento na qualidade do mesmo.

REFERÊNCIAS

AISSE, Miguel Mansur. *Sistemas de tratamento de esgotos sanitários*. ABES, 1999. Rio de Janeiro, 192p.

ALVES, João Wagner Silva e Vieira, Sonia Maria Manso. *Inventário Nacional de emissões de metano pelo manejo de resíduos*. São Paulo: CETESB, 1998. 62p.

Anuário Estatístico de Itabuna: ano base 2011. Prefeitura Municipal de Itabuna, Secretaria de Planejamento e Tecnologia.– Itabuna, BA: PMI/UESC, 2013. 257 p.: II.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9649 – Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário*. ABNT, 1986. Rio de Janeiro, 7p.

_____. *NBR 12209 – Projeto de Estações de tratamento de esgoto sanitário*. ABNT, 1992. Rio de Janeiro, 12p.

AYRES, A. P. S. *Gestão de Logística e Operações*. Curitiba: IESDE Brasil S. A., 2009.

BAHIA, Governo do Estado da. Programa de Recuperação das Bacias dos Rios Cachoeira e Almada. Superintendência de Recursos Hídricos. Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC. Relatório, 2001, 5 v.

BRASIL. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução nº 357/2005*. Expõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.

_____. *Resolução nº 377/2006*. Dispõe sobre licenciamento ambiental simplificado de Sistemas de Esgotamento Sanitário. Brasília, 2006.

_____. *Resolução nº 430/2011*. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357/2005. Brasília, 2005.

CAMPOS, J. R., *Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo*, 1ª Ed. Rio de Janeiro, Brasil, ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, Projeto PROSAB/FINEP, 1999. 443p.

CARVALHO, C. T.; CASTRO, A. A.; VIANNA, N. S. Subsídios para fixação de parâmetros para projetos de sistemas de esgotos sanitários: caso particular de carga orgânica. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIASANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., Natal, 1993. XVII Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.2. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. *Nota técnica VIII – Biogás e o mercado de crédito de carbono*. São Paulo, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Apostila do curso de Tecnologia de Controle de Poluição por Material Particulado*. São Paulo, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por sistemas de Lodos Ativados*. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 2001. 544p.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Capítulo 5: Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios por sistemas de Lodos Ativados. In: CAMPOS, J. R. (coordenador). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios*. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 2001. p. 279-331.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN HAANDEL, A.; AISSE, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. Capítulo 7: Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. In: CAMPOS, J. R.(coordenador). *Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. 1. ed. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, 1999.

COELHO, Suani Teixeira, et al. (2006). *Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás proveniente do Tratamento de Esgoto utilizando um Grupo gerador de 18 KW*. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Brasília, 2006.

COMPANHIA TECNOLÓGICA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. *Biogás: Definição*. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancasclimaticas/biogas/Biogás/17-Definição>>. Acesso em: 17 set. 2013.

COSTA, David Freire da, *Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto*, 2006. 194 p. Dissertação (Mestrado em Energia), IEE/EPUSP/FEA, São Paulo, 2006.

CRESPO, Patrício Gallegos. *Manual de projeto de estações de tratamento de esgoto*. 2 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005, 332p.

FARIA, R. A. P. *Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso*. 2012. 63 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FERNANDES, Carlos. *Esgotos Sanitários*. João Pessoa: Ed. Universitário; UFPB, 1997.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE. *Manual de Saneamento*. 4 ed. rev. Brasília: Ministério da Saúde. Brasília, 2007. 408p.

GARCEZ, Lucas Nogueira. *Elementos de Engenharia Hidráulica e Sanitária*. 2 ed. São Paulo. Editora Edgard Blücher, 1969. 356p.

ICLEI - GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE, SECRETARIADO PARAAMÉRICA LATINA E CARIBE. *Estudos técnicos sobre o potencial de aproveitamento de biogás gerado no aterro sanitário do município de Campinas - SP*. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

_____. *Manual para aproveitamento do biogás: v. 2., efluentes urbanos*. Escritório de projetos no Brasil. São Paulo, 2010, 77p.

ILHNFELD, R. G. K., ANDREOLI, C. V., LARA, A. I. *Higienização do lodo de esgoto*. In: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura. - Rio de Janeiro; PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999. 97 p. il.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa nacional de saneamento básico - 2008*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. 219p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.

_____. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio – 2012*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. 272p.

ISO 8258. *Shewhart control charts*. International Organization for Standardization. 1991.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311p.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2011. 184 p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Técnicas de pesquisa: Planejamento e execução de pesquisa, amostragens e técnicas de pesquisa, elaboração, análise e interpretação de dados*. 4 ed. São Paulo: Atlas, 1999. 231p.

METCALF, L.; EDDY, P.H. *Tratamiento y Depuración de las aguas residuales*. 2 ed., Barcelona: Editorial Labor S.A., 1981.

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. Rio de Janeiro: Gen, LTC, 2009.

PECORA, Vanessa. *Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso*. 2006.

153f. Dissertação (Mestrado – Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

PNUD, 2010. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, *Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável.*

SAMOHYL, R. W. *Controle Estatístico da Qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO. *Diagnóstico dos serviços de água e esgoto*. 2011. 432p. Brasília: MCIDADES.SNSA.

United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Standards for the use and Disposal of Sewage Sludge*. Washington: EPA, 1994.

VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996a. v. 1, 243p

_____. *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. 5 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG, 1996b. v.2, 211p.

_____. *Lagoas de estabilização*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: UFMG, 1996c, v.3.

_____. *Lodos ativados*. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental: UFMG, 1997. v.4.