

## **XI-100 - PROPOSTA DE METODOLOGIA MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA UTILIZANDO BIOGÁS ORIUNDO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES**

**Alexandre Kunkel da Costa** <sup>(1)</sup>

Doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Engenheiro Eletricista pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS (Unijuí). Engenheiro Eletricista da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

**Giuliano Crauss Daronco** <sup>(2)</sup>

Pós-Doutor em Engenharia pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com ênfase em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,) com ênfase em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Engenheiro Civil da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Avenida Salgado Filho, 570 – B. Aliança – Santo Ângelo - RS - CEP: 98.803-010 - Brasil - Tel: (55) 99908-2616 - e-mail: [alexandre.kunkel@gmail.com](mailto:alexandre.kunkel@gmail.com)

### **RESUMO**

Este artigo apresenta uma metodologia multicritério de apoio à tomada de decisão para gerenciamento e seleção de fontes de geração distribuída utilizando a biogás oriundo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo localizados em Estações de Tratamento de Efluentes (ETE). Através da obtenção do potencial da biomassa residual o modelo desenvolvido toma como base o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para avaliar os principais arranjos tecnológicos de geração frente aos aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Diante da possibilidade de transformação energética, consideram-se as seguintes alternativas para geração distribuída: turbina a vapor, turbina a gás, microturbina, células a combustível, motor de combustão alternativo e motor *stirling*. Quanto aos aspectos para avaliação, definiram-se: eficiência energética, impactos ambientais, impactos sociais, vida útil, acesso à tecnologia, capacidade de geração, custo de instalação e custo de operação e manutenção. Por fim, classificam-se as alternativas em ordem de prioridade para uso destas fontes, de acordo com a criação de cenários voltados ao propósito socioambiental e econômico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás, Manta de Lodo, Geração Distribuída, Seleção Multicritério.

### **INTRODUÇÃO**

Os serviços de coleta e tratamento de esgotos no Brasil devem aumentar consideravelmente nas próximas duas décadas, em conformidade com o Plano Nacional de Saneamento Básico. No país, 44% de domicílios possuem acesso à rede geral de esgoto, sendo que apenas 28,5% dos municípios brasileiros com esgotamento por rede pública são atendidos por estações de tratamento de esgoto. Esse plano prevê investimentos no setor na ordem de R\$ 500 bilhões e a meta estabelecida pelo governo federal é ampliar a coleta para 92% dos esgotos gerados dos quais 93% devem ser tratados até 2033. (MCID, 2013)

A utilização dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo ou UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) para o tratamento de esgoto doméstico é predominante em países tropicais, notadamente o Brasil. É possível afirmar que existem diversos sistemas operando em escala plena por mais de 10 anos e atendendo equivalentes populacionais variando de 1.000 a 1 milhão de habitantes. Rosa (2013) ressalta ainda que todas as análises de opções de tratamento incluem reatores UASB como uma das principais alternativas, em virtude do baixo custo de instalação, reduzida demanda de área e consumo de eletricidade. Para exemplificação do fato, das 539 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) apoiadas pelos recursos do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) entre 2007 e 2014, 64% são iniciadas por tratamento primário anaeróbio e 35% possuem reatores UASB. (VALENTE, 2015)

Muito embora os reatores UASB apresentem diversas vantagens como também ampla aplicação, os mesmos possuem algumas limitações que até o momento ainda não foram solucionadas, principalmente na questão ambiental, e que podem colocar em cheque a sua utilização. Dentre as principais implicações está a geração de resíduos, como o biogás e o lodo, oriundos do processo de digestão anaeróbia.

Por sua vez, o biogás é composto em sua maior parte por dois gases: metano ( $\text{CH}_4$ ), constituinte energético, e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). O  $\text{CH}_4$  é considerado o mais importante gás de efeito estufa (GEE) emitido durante o tratamento de efluentes industriais e domésticos, por apresentar um potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* - GWP) 21 vezes maior, no horizonte de 100 anos, quando comparado ao  $\text{CO}_2$  (EUROPEAN COMMISSION, 2001). O aproveitamento energético do biogás em ETE já é uma prática comum em muitos países desenvolvidos, muito embora no Brasil ainda esteja nos estágios iniciais. Na Alemanha, das 3.000 ETE que recebem o equivalente a mais de 80% do esgoto da população, aproximadamente 1.200 aproveitam o biogás para gerar eletricidade e calor (equivalente a geração de eletricidade de 1TWh por ano). Nos Estados Unidos, há 104 ETE que operam com sistemas de cogeração de energia fazendo o uso biogás e um total de 190 MW de capacidade instalada. No Brasil, a grande maioria das estações de tratamento de esgoto doméstico, com o intuito de reduzir os impactos ambientais, simplesmente queima em flare o biogás antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético. Nos casos mais graves o biogás é lançado diretamente à atmosfera. (LOBATO, 2011)

Na busca pelo desenvolvimento sustentável das ETE, principalmente voltado ao gerenciamento dos subprodutos gerados, visualiza-se uma oportunidade para aproveitamento energético do biogás com vistas à geração distribuída (GD). Tal emprego pode tornar a ETE autossuficiente nas demandas energéticas – eletricidade e/ou calor. Além disso, outros benefícios podem ser considerados, principalmente ligados à redução dos custos operacionais, minimização dos impactos ambientais.

No que tange os tipos de GD através do biogás, é possível encontrar trabalhos que aplicam diferentes tecnologias para a transformação energética, tais como: turbina a gás, microturbina, células a combustível, motor de combustão alternativo e motor stirling. (FARRET, 2018)

Por outro lado, dentro do contexto das empresas públicas de saneamento, na tomada de decisão para projetos voltados a melhoria operacional, busca-se a aplicação de conceitos inseridos no desenvolvimento sustentável, visando o equilíbrio econômico, social e ambiental do empreendimento. Assim sendo, diversos artigos citam o crescimento da tendência de ponderação de fatores que minimizam os impactos ambientais e sociais na escolha da alternativa tecnológica de geração (REIS, 2012), o que evidencia, portanto, a busca por mecanismos de gerenciamento dos critérios para a seleção. Não obstante, a natureza multidimensional dos objetivos, ora conflitante, torna complexo o planejamento e a tomada de decisão de escolha do tipo de projeto.

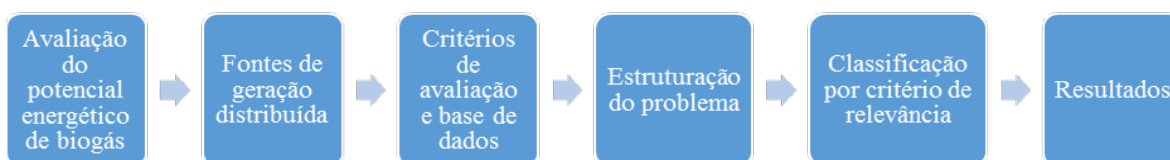
Portanto, os métodos multicritérios são considerados importantes ferramentas de gestão e auxílio à tomada de decisão. Eles remetem a escolha da alternativa mais satisfatória e harmoniosa, frente a um conjunto de critérios previamente estabelecidos e cenários que incorporam os interesses e preferência do agente de decisão. Com relação à seleção de fontes de GD é possível encontrar pesquisas com a aplicação de métodos compensatórios, desenvolvidos pela escolha americana, como o AHP, além de métodos não compensatórios, desenvolvidos pela escola francesa, como o PROMETHEE, ELECTRE (TAHA, 2013). É possível também encontrar trabalhos com métodos híbridos, como o MACBTEH e integração com a lógica fuzzy (BARIN, 2012).

## OBJETIVOS

Neste artigo foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia multicritério para seleção de sistemas de geração distribuída utilizando a biogás oriundo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo localizados em ETE. Desta forma, o principal objetivo constitui-se em encontrar a fonte mais apropriada para geração de energia elétrica diante de cinco possíveis alternativas, considerando oito subcritérios de origem técnica, econômica, ambiental e social. Além disso, para a simulação foram criados cenários com relevância socioambiental e econômica.

## METODOLOGIA

Para aplicação da metodologia, inicialmente é avaliado o potencial energético de biogás. Na sequência foram definidas as fontes de geração distribuída e os critérios de avaliação. Como passo seguinte definiu-se a base de dados, contendo informações com atributos qualitativos e quantitativos dos critérios de cada fonte de geração e estabeleceu-se a estruturação do problema por meio de uma cadeia hierárquica. Por fim, foram criados os cenários para a simulação e aplicação do método multicritério, conforme ilustra a Figura 1.



**Figura 1: Metodologia proposta para a seleção de sistemas de GD**

Fonte: autoria própria

Muito embora as tomadas de decisão intrínsecas ao aproveitamento energético do biogás devam ser pautadas em análises de medições, muitas vezes, essas não são exequíveis. Por isso, para avaliação do potencial energético do biogás nas ETE, sugere-se a aplicação do modelo visto em Lobato (2011), o qual se baseia em um modelo matemático, levando em consideração o balanço de massa da demanda química de oxigênio (DQO) e todas as perdas e rotas de conversões possíveis da matéria orgânica dentro de um reator UASB.

## PRIMEIRA ETAPA: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Para avaliação do potencial energético do biogás, sugere-se a utilização do software de simulação ProBio 1.0, desenvolvido em parceria entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Tal ferramenta é de uso livre e utiliza a lógica de programa baseada no modelo matemático de estimativa de produção de biogás em reatores UASB proposto por Lobato (2011). Além disso, considera três cenários de simulação que acarretam em potenciais de recuperação de CH<sub>4</sub> diferentes: (i) pior situação; (ii) situação típica; e (iii) melhor situação.

A pior situação, na qual o potencial energético é menor, refere-se aos sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato (SO<sub>4</sub>) maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de CH<sub>4</sub>. A melhor situação, onde o potencial energético é maior, refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de SO<sub>4</sub>, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de CH<sub>4</sub>. Para a situação típica são utilizados índices intermediários para os parâmetros descritos anteriormente.

## SEGUNDA ETAPA: FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De posse do potencial energético, são eleitas as principais fontes de geração distribuída. Para este artigo foram utilizadas as seguintes tecnologias: turbina a gás (TG), microturbina (MT), células a combustível com uso do biogás ou hidrogênio (CC), motor de combustão alternativo (MC) e motor *stirling* (MS).

## TERCEIRA ETAPA: CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO E BASE DE DADOS

A Tabela 1 apresenta os critérios definidos para avaliação das alternativas tecnológicas, de acordo com a natureza técnica, econômica, social e ambiental, a respectiva identificação e a caracterização do atributo. Já a Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam a base de dados quantitativa e qualitativa, respectivamente, para aplicação da metodologia proposta.

**Tabela 1: Identificação dos critérios para avaliação das alternativas**

<b>Critério</b>	<b>Subcritério</b>	<b>Identificação</b>	<b>Atributo</b>
Técnico	Eficiência elétrica	EE	Quantitativo
	Capacidade de geração	CG	Qualitativo
	Acesso à tecnologia	AT	Qualitativo
	Vida útil	VU	Quantitativo
Econômico	Custa da instalação	CI	Quantitativo
	Custo de operação e manutenção	O&M	Quantitativo
Ambientais	Impactos ambientais	IA	Qualitativo
Sociais	Impactos sociais	IS	Qualitativo

**Tabela 2: Base de dados quantitativa para aplicação da metodologia**

<b>Atributo</b>	<b>Quantitativo</b>			
<b>Critérios</b>	<b>EE</b>	<b>VU</b>	<b>CI</b>	<b>O&amp;M</b>
<b>Alternativas</b>	<b>(%)</b>	<b>(anos)</b>	<b>(US\$/kW)</b>	<b>(US\$/kWh)</b>
TG	30	15	2000	0,010
MT	28	20	2200	0,009
CC	50	8	6000	0,001
MC	35	20	1200	0,012
MS	30	10	2500	0,014

**Tabela 3: Base de dados qualitativa para aplicação da metodologia**

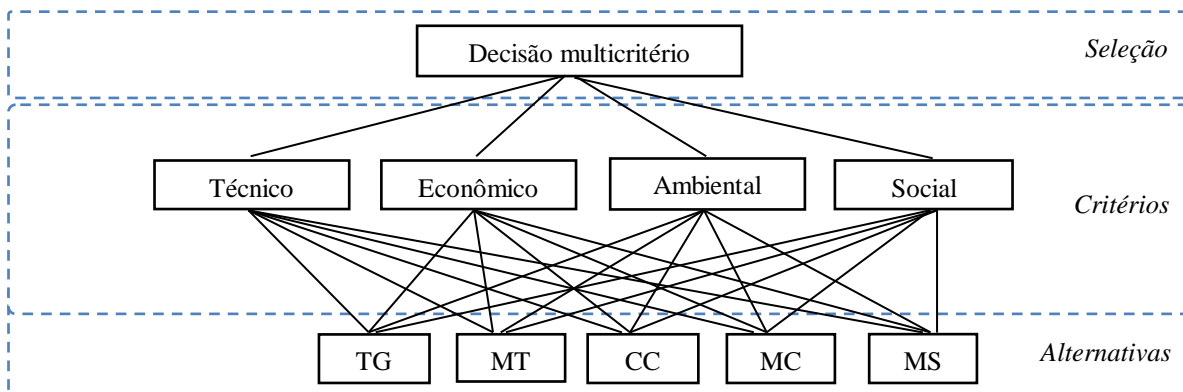
<b>Atributo</b>	<b>Qualitativo (“quanto maior, melhor”)</b>			
<b>Critérios</b>	<b>CG</b>	<b>AT</b>	<b>IA</b>	<b>IS</b>
<b>Alternativas</b>	<b>(0 a 1)</b>	<b>(0 a 1)</b>	<b>(0 a 1)</b>	<b>(0 a 1)</b>
TG	0,4	1	0,6	0,9
MT	0,9	0,7	0,65	0,9
CC	0,6	0,4	0,8	0,9
MC	0,9	0,9	0,7	0,9
MS	0,7	0,7	0,6	0,9

Cada subcritério corresponde a uma determinada característica, de acordo com a sua natureza:

- Eficiência elétrica (EE): refere-se à quantidade útil de energia elétrica fornecida, a partir da fonte primária do biocombustível, ou seja, a eficiência no processo de conversão energética do biogás para geração de energia elétrica.
- Capacidade de geração (CG): refere-se à confiabilidade e adaptabilidade da tecnologia no atendimento constante da demanda elétrica.
- Acesso à tecnologia (AT): avalia qualitativamente a caracterização tecnológica do sistema, ponderando: a taxa de maturidade tecnológica e a sua penetração nos mercados internacionais; a existência de equipamentos e alternativas factíveis e análogas (também chamado de *spin off* técnico).
- Vida útil (VU): refere-se à estimativa de vida útil da planta.
- Custo de instalação (CI): é composto por todas as despesas relativas ao custo da instalação do empreendimento: compra de equipamentos mecânicos, instalações tecnológicas, interligação à rede elétrica (caso necessário), serviços de engenharia, outros trabalhos de construção.
- Custo de operação e manutenção (O&M): refere-se ao custo de operação (que inclui salários dos funcionários e do próprio funcionamento da usina) e ao custo de manutenção (relacionada às ações corretivas do sistema, quanto para prolongar a vida útil e evitar falhas que podem levar à suspensão de operação).
- Impactos ambientais (IA): avalia os impactos ambientais relacionadas ao âmbito ecológico e meio ambiente, sob a ótica do aproveitamento bioenergético da biomassa, das alterações climáticas e redução de emissão de gases poluentes.
- Impactos sociais (IS): subcritério que avalia os benefícios sociais referentes à: geração de emprego e geração descentralizada de energia.

#### QUARTA ETAPA: ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 2 ilustra a estruturação do problema contemplando os critérios e alternativas para a aplicação do método multicritério de apoio à tomada de decisão.



**Figura 2: Estruturação do problema por meio de hierarquia**

Fonte: autoria própria

#### QUINTA ETAPA: CLASSIFICAÇÃO POR CRITÉRIO DE RELEVÂNCIA

Foram definidos os critérios por relevância socioambiental e econômica a fim de estabelecer os cenários para simulação e, posteriormente, obtenção de resultados. Desta forma estabeleceu-se:

- Cenário socioambiental – 1º impactos ambientais, 2º impactos sociais, 3º eficiência elétrica, 4º vida útil, 5º capacidade de geração, 6º acesso à tecnologia, 7º custo de instalação e 8º custo de operação e manutenção.
- Cenário econômico – 1º custo de instalação, 2º custo de operação e manutenção, 3º vida útil, 4º acesso à tecnologia, 5º capacidade de geração, 6º eficiência elétrica, 7º impactos sociais, e 8º impactos ambientais.

#### RESULTADOS FINAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para obtenção dos resultados finais foi proposto o método compensatório *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (1991), cujo emprego é voltado à resolução de problemáticas de ordenação. Sua teoria reflete a tomada de decisão do raciocínio humano, no qual os elementos são distribuídos em grupos, conforme a atribuição das propriedades comuns. A escolha pela aplicação do método AHP dentre diversas outras opções de análises se deu em função da facilidade de acesso à base teórica, bem como a avaliação das simulações desenvolvidas a cada instância, o que auxilia o entendimento dos resultados finais.

Após a aplicação da metodologia e da técnica AHP, a Tabela 4 apresenta as prioridades relativas finais calculadas (RFW) e a classificação final (CL) das alternativas tecnológicas, no cenário socioambiental e econômico, respectivamente.

**Tabela 4: Classificação final das alternativas – cenário socioambiental (SA) e econômico (EC)**

Fontes	PR Final - SA	Classificação - SA	PR Final - EC	Classificação - EC
<b>TG</b>	0,114	5º	0,197	4º
<b>MT</b>	0,245	3º	0,210	3º
<b>CC</b>	0,426	1º	0,259	2º
<b>MC</b>	0,282	2º	0,291	1º
<b>MS</b>	0,119	4º	0,101	5º

## CONCLUSÕES

Conclui-se que o biogás é uma alternativa viável para geração descentralizada de energia e as técnicas multicritérios de apoio à decisão apontam para a solução harmoniosa, frente aos critérios expostos e as possíveis alternativas tecnológicas. As opções de maior relevância do problema descrito, considerando o cenário socioambiental e o cenário econômico, foram: célula a combustível e motor de combustão, respectivamente. Os resultados atingidos com a utilização do método AHP mostraram-se satisfatórios.

Neste artigo foram consideradas as análises de aplicações de GD utilizando o biogás, no entanto poderiam ser avaliados casos que fazem uso de outros tipos de biomassa residual, como o lodo, por exemplo, através da mesma metodologia. É válido ressaltar também que os cenários foram previamente traçados buscando-se incorporar a influência dos *stakeholders* na tomada de decisão. Além disso, é importante destacar a necessidade da constante revisão dos dados técnicos referente às alternativas tecnológicas. Tais medidas contribuem para a confiabilidade do gerenciamento e seleção das alternativas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARIN, A. Seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos: uma abordagem com a lógica difusa. Santa Maria. 2012. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
2. EUROPEAN COMMISSION. Environmental pressure indicators for the EU. Eurostat, Data 1985-98; Office for official publications of the European Communities. Luxemburgo, 2001.
3. FARRET F.A., SIMOES M.G. Integration of Renewable Sources of Energy. New Jersey: John Wiley & Sons; 2018.
4. LOBATO, L. C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Belo Horizonte. 2011. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
5. Ministério das Cidades – MCID. Plano Nacional de Saneamento Básico. Brasília: MCID, 2013.
6. REIS, L. B.; FADIGAS, E. A.; CARVALHO, C.E. Energia, Recursos Naturais e Prática do Desenvolvimento Sustentável. Barueri: Manole, 2ª ed., 2012.
7. ROSA, A. P. Aproveitamento energético de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto. Belo Horizonte. 2013. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
8. SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. Rio de Janeiro: Makron Books do Brasil Editora Ltda e Editora McGraw-Hill do Brasil, 1991.
9. TAHA, R. A.; DAIM, T. Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology, Vol. 16, N° 1, 2013.
10. VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. Rio de Janeiro. 2015. Dissertação de mestrado-Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.