REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

SELEÇÃO DE UMA FONTE DE ENERGIA RENOVÁVEL PARA UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL UTILIZANDO O SOFTWARE MACBETH¹

CRISTIANO REGIS FREITAS DE BRITO², ISADORA ARAUJO PIMENTEL
CARVALHO³, BRIGIDA MIOLA⁴, FRANCISCO DE ASSIS LEANDRO FILHO⁵

¹Publicado no 1º Trimestre de 2018;

²Professor Me. na Universidade de Fortaleza- UNIFOR, cristianocrfb@gmail.com;

³Engenheira Ambiental e Sanitária pela Universidade de Fortaleza- UNIFOR, isadoraapc@gmail.com;

⁴Doutoranda em Ciências Marinhas e Tropicais no Instituto de Ciências do Mar na Universidade Federal do Ceará- UFC, bmiola@unifor.br;

⁵Doutorando em Física na Universidade Federal do Ceará- UFC, fco07leandro@gmail.com.

Resumo: A discussão sobre o cenário ambiental vem se destacando gradativamente na sociedade, inclusive no que diz respeito à questão da produção energética de uma forma menos agressiva ao meio ambiente. Este artigo tem como objetivo fazer a escolha de uma energia renovável a ser implementada em um condomínio residencial localizado no município de Eusébio, Ceará, dentre os seguintes tipos de energia: produzida pelo biodigestor, solar fotovoltaica, solar térmica e eólica. Trata-se de um estudo quantitativo realizado através do *software* MACBETH. A área comum do condomínio consome cerca de 1260 kWh/mês, o que equivale a um gasto médio mensal de R\$ 1043,5, sendo este um dado de referência para a análise do potencial de economia que cada tipo de energia pode proporcionar. Todos os sistemas aqui analisados, possuíam sua potência limitada pela quantidade de resíduos orgânicos gerada no condomínio, para efeito de comparação. Os critérios utilizados para a análise foram: Custos de Aquisição e Operação/Manutenção; Tempo de retorno do investimento; Economia total após Payback. Como resultado, definiu-se que a melhor opção

de sistema a ser implantada é o solar térmico, seguido pelo sistema solar fotovoltaico, eólico e, por último, o sistema de biodigestão.

Palavras-chave: Sistema de apoio à decisão, Método MACBETH, Energias renováveis, Sustentabilidade ambiental.

SELECTION OF A RENEWABLE ENERGY SOURCE FOR TOWNHOUSE USING MACBETH SOFTWARE

Abstract: The discussion about the environmental scenario has been gradually inserting into society, including the issue of energy production in a less aggressive way to the environment. For this, the subject of alternative energy is still not so much covered for achieving a more sustainable development. This paper aims to made the choice of one renewable energy to be implemented in a residential condominium located in the city of Eusébio, Ceará, between the following types of energy: produced by the biodigester, solar photovoltaic, solar thermal and wind power. This is a quantitative study and use the MACBETH software. The common area of the condominium consumes 1260 kWh/month, which is equivalent to an average monthly expenditure of R\$ 1.043,5. All systems had their power limited by the amount of organic waste. The criteria used for this analysis were: Acquisition Costs and Operation/Maintenance; Return time of investment; and Total savings after Payback. At the end, the work points to the best system option to be chosen was solar thermal, comparing it to the other options presented.

Keywords: Decision-making methods, MACBETH method, Renewable energy. Environmental sustainability

1. Introdução

A busca pelo desenvolvimento sustentável, ambientalmente correto, socialmente justo, economicamente viável e tecnologicamente adequado está cada vez mais visada. A preocupação com as questões ambientais inclui diversos fatores, entre eles a redução dos gases poluentes para a preservação do meio ambiente. Os riscos à segurança energéticas nacionais e globais são ainda mais exacerbados pelo custo crescente da energia e pela

competição pelos recursos energéticos distribuídos irregularmente. Dessa forma, um futuro de energia sustentável é o grande desafio dos próximos séculos..

Tendo em vista o crescente consumo de energia e como consequência o aumento de impactos ambientais causados por fontes tradicionais (combustíveis fósseis), a busca por energias alternativas como a solar, eólica, biomassa, dentre outras, está nitidamente se tornando fundamental. Essas fontes de energia alternativa produzem energia de uma maneira bem menos agressiva ao planeta Terra.

O Brasil possui um potencial muito grande para o aproveitamento de recursos energéticos renováveis. A biomassa é fonte de energia elétrica desde o século 19, atualmente, com tecnologias mais avançadas tem aumentado a produção de eletricidade e biocombustíveis substituindo derivados de petróleo. O potencial eólico no País também expandiu-se de forma acelerada ao longo da última década, atingindo a escala de gigawatts de produção de energia.

A energia solar é outra fonte com grande potencial no país, apesar da geração fotovoltaica ser a menos consumida entre as formas renováveis que compõem a matriz elétrica do Brasil. A energia solar fotovoltaica ainda possui um custo elevado quando comparada com outras fontes alternativas, porém já evoluiu bastante com relação a sua eficiência e rentabilidade. Já pode-se ver no mercado diversos exemplos que utilizam este tipo de geração de energia, como carros elétricos, notebooks com carregador elétrico, dentre outros. A energia solar térmica também não fica atrás no mercado, já existem condomínios que utilizam esta energia para diminuir o gasto com o consumo de energia elétrica.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em julho de 2017, o Brasil tinha aproximadamente 207,7 milhões de habitantes e uma taxa de crescimento populacional de 0,77% entre 2016 e 2017, um pouco menor do que a taxa 2015/2016 (0,80%). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), mais de 80% da demanda energética brasileira é residencial.

Em 26 de abril de 2002, foi criado um programa para incentivar o uso de fontes alternativas de energia, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA).

Este programa foi revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, que assegurou uma maior participação dos estados, assim como o incentivo à indústria nacional e a exclusão de consumidores de baixa renda do rateio da compra da nova energia. Esse projeto tem o suporte do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e financia

projetos de geração de energia eólica, Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), biogás de aterro sanitário, dentre outros (BERMANN, 2002).

O presente artigo apresenta um estudo sobre a seleção de uma fonte de energia alternativa a ser instalada em um conjunto habitacional, de forma econômica e ambientalmente mais benéfica. A escolha está sustentada na teoria dos sistemas de apoio à decisão, que foram essenciais para ajudar na escolha da fonte de energia, tendo em vista que avaliam os múltiplos critérios, suas ponderações e consequências para determinar qual a decisão que melhor atende o objetivo geral.

Este estudo analisa alguns critérios para a seleção de uma energia renovável, dentre biogás, energia solar térmica, energia solar fotovoltaica e energia eólica, a ser implementada em um condomínio localizado no município de Eusébio, no estado do Ceará, através do método MACBETH.

2. *Materiais e métodos*

Neste trabalho, serão comparadas as seguintes fontes de energia alternativa: biomassa, solar fotovoltaica, solar térmica e eólica, com o objetivo de verificar qual delas é a mais viável financeiramente para instalação em um condomínio residencial para abastecimento parcial ou total da sua área comum. As características de cada uma das energias alternativas serão analisadas os dados inseridos no software MACBETH, versão 2.4, para que as ponderações e julgamentos sejam realizados, finalizando na escolha da melhor alternativa.

2.1 *Sistemas de apoio à decisão*

Para problemas cotidianos e mais comuns, as tomadas de decisão baseadas somente na intuição podem trazer resultados aceitáveis porque envolvem poucos objetivos e normalmente somente uma ou duas pessoas que devem tomar uma decisão. Quando o assunto é sobre a energia, os problemas ficam mais complexos e é necessário usar um sistema de apoio à decisão. O Sistema de Apoio à Decisão (SAD) é um sistema específico para resolver problemas organizacionais, através de informações e modelos especializados. Sua diferenciação está no fato de que consegue apoiar tomadas de decisão em áreas de planejamento estratégico, controle gerencial e operacional (LOUREIRO *et al.*, 2016).

O MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical based Evaluation Technique*) é um método de apoio à decisão que permite avaliar opções levando em conta vários critérios. Ele utiliza julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividades, na qual essa diferença de atratividade pode ser muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte ou extrema. Caso o julgamento esteja inconsistente, o MACBETH identifica a origem do problema e também indica sugestões para resolver esse problema de inconsistência.

À medida que os julgamentos são introduzidos no software, este verifica automaticamente a sua consistência. Tendo por base os julgamentos do decisor, uma escala de pontuações é gerada. Através de um processo semelhante os pesos são determinados para cada critério. Os critérios para a escolha da melhor energia alternativa a ser utilizada no condomínio foram determinados pelos autores de acordo: Custo de Aquisição; Custo de Operação/Manutenção; Tempo de retorno do investimento; Economia total após *Payback*.

2.2 Dados do empreendimento

O condomínio residencial de casas (Figura 1) escolhido para o estudo está localizado no município de Eusébio, no estado do Ceará, ocupa uma área de aproximadamente 10.000m², possui 18 casas e cerca de 80 pessoas residem no mesmo.

Figura 1. Delimitação do condomínio

O conjunto possui uma área comum que consome cerca de 1260kWh/mês, com iluminação dessas áreas (hall de entrada, corredores, portaria etc) e bombeamento de água quando necessário, tendo um gasto médio mensal de R\$1043,5, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Consumo médio mensal do condomínio.

	HISTÓRICO DE CONSUMO DO CONDOMÍNIO - 2015												
	MED	Dez	Nov	Out	Set	Ago	Jul	Jun	Mai	Abr	Mar	Fev	Jan
(kWh)	1260	1231	1302	1238	1070	1062	1058	1045	1117	1515	1404	1361	1718
(R\$)	1043,5	1019,47	1078,27	1025,27	886,14	879,51	876,2	865,43	925,06	1254,67	1162,74	1127,13	1422,79

2.2 Dimensionamento básico dos sistemas de geração

Dentre todos os sistemas que serão analisados, o sistema de geração de energia através de biomassa (biodigestor) possui potência limitada pela quantidade de resíduos orgânicos gerados pelos moradores do condomínio. Dessa forma, a fim de viabilizar a comparação entre os sistemas de energia, este foi o primeiro modelo a ser dimensionado e os demais foram calculados de modo a possuir igual potência instalada do biodigestor, ou pelo menos valores mais próximos possíveis.

2.3 Sistema de geração energia elétrica através da biomassa

Para este sistema de geração de energia elétrica, foi escolhido o biodigestor tubular de polietileno, uma vez que este possui as vantagens de ter menores custos de instalação e manutenção, de exigir pouca tecnologia, e ter fácil operação, excluindo a necessidade de mão-de-obra qualificada para o trabalho.

A estimativa da quantidade de resíduos gerados no conjunto habitacional foi realizada durante sete dias, através da pesagem diária dos resíduos orgânicos (restos de alimentos) de oito casas (35 moradores). A quantidade total de resíduos foi então extrapolada para os 80 moradores do condomínio.

O dimensionamento do biodigestor tubular de polietileno foi realizado seguindo-se a metodologia proposta por Carreas (2013). O quadro 1 mostra os dados característicos aos resíduos orgânicos utilizados neste trabalho, de acordo com a literatura.

Quadro 1 - Características de restos de alimentos de acordo com a literatura.

	RESTOS DE ALIMENTOS	FONTE
pH	6,51	Fernández; Pérez; Romero (2008)
Densidade (g/L)	666	Fernández; Pérez; Romero (2008)
Percentual de diluição	80%	Fernández; Pérez; Romero (2008)
Sólidos voláteis (g/kg)	241	El-Mashad; Zhang (2010)
Sólidos totais (g/kg)	280	El-Mashad; Zhang (2010)

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

Além dos dados mencionados no quadro 1, outros parâmetros foram também importantes para o dimensionamento do biodigestor, como o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH). Matematicamente, o TDH de um biodigestor é descrito como:

$$TDH = \frac{V_L}{Q} \quad (1)$$

Onde: V_L = volume da fase líquida, em m^3

Q = Vazão de entrada do biodigestor, em m^3/dia ;

A estimativa do potencial energético do biogás foi realizada a partir da quantidade de resíduos gerados pelos moradores do condomínio e da produção esperada de biogás a partir de dados da literatura.

Como a quantidade de sólidos voláteis dos restos de alimentos é cerca de 0,241 kgSV/Kg de resíduo, consegue-se obter cerca de 158,3L_{biogás}/kg de resíduos ou 85,48 L_{CH₄}/kg de resíduo. Este dado será utilizado como referência para determinação da quantidade de biogás.

Outro dado importante na estimativa do potencial energético do biogás gerado é o poder calorífico do mesmo. Mitzlaff (1988) esboça algumas equações para a determinação do poder calorífico inferior de biogás com diferentes concentrações de metano:

$$\rho_{CH_4} = \rho_{CH_4,CNTP} \times \frac{P}{P_{CNTP}} \times \frac{T_{CNTP}}{T} \quad (2)$$

Onde: ρ_{CH_4} = densidade do metano nas condições de operação (kg/m³);

$\rho_{CH_4,CNTP}$ = densidade do metano nas Condições Normais de Temperatura e Pressão, igual a 0,72 kg/m³;

P = Pressão de operação (kPa);

P_{CNTP} = Pressão nas CNTP, igual a 101,33kPa;

T = Temperatura de operação (K);

T_{CNTP} = Temperatura nas CNTP, igual a 273,15K;

$$PCI = \%CH_4 \times \rho_{CH_4} \times PCI_{CNTP} \quad (3)$$

Onde: PCI = Poder calorífico inferior do biogás(kJ/m³);

ρ_{CH_4} = densidade do metano nas condições de operação (kg/m³);

PCI_{CNTP} = Poder calorífico inferior do metano nas CNTP, igual a 50.000kJ/kg;

2.4 Sistema de geração fotovoltaica

A área útil pode ser calculada através da divisão da potência gerada pelo biodigestor pela irradiação solar:

$$AU = \frac{PB}{IR} \quad (4)$$

Onde: AU = área útil (m²);

PB = potência gerada pelo biodigestor (kWh/mês);

IR = irradiação solar (Kwh/m² x mês);

Conforme o Quadro 2, o mês que possui menor valor é o de dezembro, com irradiação de 4,64 kWh/m² por dia, ou seja, 139,2 kWh/m² por mês.

Quadro 2 - Valores de irradiação solar diários de Fortaleza.

MÊS	IRRADIAÇÃO SOLAR (kWh/m ² x dia)
Janeiro	4,81
Fevereiro	4,95
Março	4,87
Abril	4,89
Maio	5,63
Junho	5,60
Julho	5,81
Agosto	6,43
Setembro	6,31
Outubro	5,75
Novembro	5,16
Dezembro	4,64
ANUAL	5,40

Fonte: Adaptado de PVWATTS, 2016.

Com a área útil calculada, pode-se saber qual o número de placas necessário para o sistema:

$$N^{\circ} \text{ de placas} = \frac{AU}{AP \times E} \quad (5)$$

Onde: AP = área da placa do fabricante (m²);

E = eficiência da placa do fabricante (%);

2.5 Sistema solar térmico

Este tipo de sistema irá possuir uma diferença quando comparado com os outros, pois não irá produzir energia elétrica, mas sim uma economia no gasto com energia. O cálculo do dimensionamento do sistema solar térmico depende muito das necessidades e características de aplicação.

O fator que mais gasta energia quando se trata de água é o chuveiro elétrico, segundo Soletrol (2016), por isso o sistema será dimensionado para o consumo de água quente somente em chuveiros elétricos. Como todos os outros sistemas irão atender a área comum do condomínio, este será dimensionado para o banheiro da portaria do conjunto habitacional, onde a energia utilizada terá o mesmo valor da que foi dimensionada através dos resíduos orgânicos para o biodigestor. A quantidade de coletores solares segue uma proporção de 100 L

para 1 coletor solar. A fórmula para o cálculo da quantidade de energia necessária para o aquecimento de 1L de água é:

$$\text{Consumo} = \frac{\text{Pot}}{\text{n}^\circ \text{ banhos} \times Q \times T_{\text{banho}} \times 30 \text{ dias/mês}} \quad (6)$$

Onde: Pot = potência do chuveiro elétrico adotado (kWh/mês);

nº banhos = número de banhos por dia;

Q = vazão do chuveiro adotado (L/min);

Tbanho = tempo de duração de um banho (min);

Deste modo, o volume a ser aquecido, que é igual ao volume mínimo do reservatório, foi determinado pela divisão entre a potência do biodigestor pela multiplicação do número de duchas pelo consumo médio:

$$\text{Volume a ser aquecido} = \frac{\text{PB}}{\text{Consumo} \times 30 \text{ dias/mês}} \quad (7)$$

Após esse cálculo, aplicou-se a relação de 1 coletor solar para cada 100 litros diários (SOLETROL, 2016) para a determinação da quantidade de placas solares necessárias.

2.6 Sistema de geração eólica

Com a potência necessária do sistema eólico já definida (biodigestor) foi escolhida uma turbina eólica que gerasse uma quantidade de energia o mais próximo possível a do biodigestor (para fins de comparação). A partir da turbina eólica escolhida e com base em pesquisas bibliográficas, foram estimados os custos de aquisição e operação/manutenção. A velocidade média anual do vento, em Fortaleza, é de 5,66 m/s. Para este estudo, foi escolhida uma turbina eólica de eixo horizontal Modelo WHISPER 200, com velocidade bem próxima à do local de instalação.

2.7 Estimativa do tempo de retorno do investimento

A estimativa do tempo de retorno foi realizada através da somatória dos custos de aquisição e manutenção/operação de cada um dos sistemas, dividido pela economia mensal relativo ao consumo de energia oriunda da concessionária:

$$\text{Tempo de retorno} = \frac{\sum \text{custos (R\$)}}{\text{economia mensal (R\$)}} \quad (8)$$

2.8 Economia total após Payback

O tempo de retorno financeiro, ou *Payback*, não leva em conta a economia que os sistemas terão após o mesmo acabar. Por isso, os autores resolveram adotar como critério a economia total após *Payback*, que irá depender da vida útil (em anos) e da economia anual (R\$) de cada uma das energias avaliadas:

$$\text{Economia total} = \text{economia mensal} \times 12 \text{ meses} \times (\text{vida útil} - \text{tempo de retorno}) \quad (9)$$

3. Resultados e Discussão

3.1 Sistema de geração de energia através de biomassa: biodigestor

O Quadro 3 mostra os resultados obtidos durante o levantamento da quantidade de resíduos que são gerados pelo conjunto habitacional, através da pesagem dos resíduos de 8 casas residenciais durante os 7 dias.

Quadro 3- Médias diárias de resíduo orgânico gerado em 8 casas.

DIAS	Nº DE HABITANTES								MÉDIA POR DIA (Kg/hab.dia)
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1º dia	0,30	2,40	1,90	0,30	2,40	0,90	3,60	0,40	0,35
2º dia	0,50	2,90	2,60	x	2,80	1,20	2,30	0,60	0,43
3º dia	0,60	x	2,20	2,10	2,90	1,90	x	0,50	0,43
4º dia	0,50	2,00	x	2,90	0,60	x	1,10	0,70	0,29
5º dia	0,40	2,30	2,00	3,40	2,20	0,70	1,90	0,30	0,38
6º dia	0,70	2,40	2,30	2,50	2,50	0,80	2,20	0,80	0,41
7º dia	0,60	1,20	1,80	1,90	1,80	0,24	2,10	0,90	0,30
TOTAL (Kg)	3,600	13,200	12,800	13,100	15,200	5,740	13,200	4,200	0,368
MÉDIA POR PESSOA (Kg/hab)	0,900	3,300	3,200	2,620	3,800	1,435	1,886	1,400	

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

A média de geração de resíduo por pessoa por dia é de 0,368kg/hab.dia. Dessa forma, como o condomínio possui aproximadamente 80 moradores, a quantidade total aproximada de resíduos será de:

$$\text{Produção diária} = 80\text{hab} \times \frac{0,368\text{kg}}{\text{hab. dia}} = \frac{29\text{kg}}{\text{dia}}$$

Seguindo a metodologia proposta por Carreas (2013), a vazão diária de resíduos que entrará no biodigestor será:

$$\text{Vazão} = \frac{\text{Produção diária}}{\text{Densidade}} = \frac{29\text{kg}}{\text{dia}} \frac{\text{m}^3}{666\text{kg}} = \frac{0,043\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Vale ressaltar que esta vazão representa apenas a vazão de resíduos, sem levar em conta a diluição de 80%, recomendada por Fernández, Pérez e Romero (2008), ou seja, quatro partes de água para uma de resto de alimento. Assim a vazão total, Q , que adentrará o biodigestor será de:

$$Q = 0,043 + 0,043 \times 4 = \frac{0,215\text{m}^3}{\text{dia}}$$

Ou seja, com uma vazão de restos de comida é de 0,043m³/dia, deve-se usar 0,172m³ de água, de modo que adentram no biodigestor, todos os dias, 0,215m³ de mescla (mistura restos de comida e água).

Deste modo, o volume estimado da fase líquida do biodigestor foi de:

$$V_L = \text{TDH} \times Q = 30 \text{ dias} \times \frac{0,215\text{m}^3}{\text{dia}} = 6,45\text{m}^3$$

Neste tipo de biodigestor, Carreas (2013) recomenda reservar 25% do espaço total disponível para acomodar o gás que será gerado durante o processo, assim, o volume da fase líquida é 3 vezes maior que o volume da fase gasosa. Logo:

$$V_G = \frac{1}{3} V_L = \frac{1}{3} \times 6,45 \text{ m}^3 = 2,15 \text{ m}^3$$

O volume total do biodigestor é, portanto, a soma do volume da fase líquida e com o volume da fase gasosa:

$$V_{\text{biodigestor}} = V_L + V_G = 6,45 \text{ m}^3 + 2,15 \text{ m}^3 = 8,6 \text{ m}^3$$

Segundo El-Mashad e Zhang (2010), consegue-se obter cerca de 158,3L_{biogás}/kg de resíduos, com 54% de metano, e no condomínio são produzidos 29kg de resíduo por dia, espera-se que o sistema consiga produzir o equivalente a 4,59m³ de biogás diários com 2,48m³ de metano.

Para o cálculo do potencial energético do sistema, utilizou-se as correlações termodinâmicas relatadas em Mitzlaff (1988), utilizando como dados de entrada a temperatura média do ambiente onde o biodigestor será instalado, de 28°C, a pressão de trabalho do sistema de 100mmH₂O, acima da pressão atmosférica (~102,3kPa),

$$\rho_{\text{CH}_4} = 0,72 \times \frac{102,3}{101,33} \times \frac{273,15}{301} = \frac{0,66 \text{ kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{PCI} = 0,54 \times \frac{0,66 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{50000 \text{ kJ}}{\text{kg}} = \frac{16.820 \text{ kJ}}{\text{m}^3}$$

Portanto, a produção esperada de energia será de:

$$\text{Energia} = \text{PCI} \times Q_{\text{biogás}} = \frac{16.820 \text{ kJ}}{\text{m}^3} \times \frac{4,59 \text{ m}^3}{\text{dia}} = \frac{81,8 \text{ MJ}}{\text{dia}} = \frac{22,7 \text{ kWh}}{\text{dia}}$$

Com este potencial diário, o sistema irá produzir cerca de 682kWh/mês.

Considerando que a eficiência do gerador de 1200 W é de 25%, a potência de energia elétrica gerada é de 170,5 kWh/mês, suprimindo pouco mais de 13,5% do consumo mensal da área comum do condomínio, o que representa uma economia aproximada de R\$ 141,00/mês.

No processo final de todo biodigestor é produzido gás, efluente e lodo. O gás será utilizado para a produção de energia, o lodo digerido possui propriedades fertilizantes

(BARBOSA *et al.*, 2007), podendo ser vendido para este fim. Já o efluente líquido, que também possui propriedades fertilizantes (embora menos que o lodo digerido), será utilizado na irrigação (BERNARDI, 2003) da área verde do condomínio de aproximadamente 300 m².

O biodigestor dimensionado produzirá, diariamente, 4,6 kg de biogás, cerca de 172 L de efluente líquido e 24 kg de lodo. O lodo possui preço de mercado que varia entre R\$70,00 a R\$120,00 por tonelada, e o mesmo será retirado a cada 3 meses para evitar o entupimento do biodigestor. Dessa forma, a cada manutenção (retirada do lodo) serão removidas 2,16 toneladas de lodo, que poderão ser vendidas ao valor aproximado de R\$200,00.

O custo do sistema de biodigestão foi orçado por volta de R\$14.850,00, pela empresa BGS Equipamentos, especializada na produção de energia através de biogás, com garantia de 5 anos. O sistema precisará de uma bomba de sucção de esgoto para realizar a dragagem do sistema (retirada de lodo). Para isto foi escolhida uma moto bomba Vulcan Modelo B2T 701, estimada em R\$ 900,00 e vida útil estimada em 5 anos. Além disso, o purificador de gases, que acompanha o sistema de biodigestão, necessita ser trocado a cada 1 ano no valor de R\$374,00.

Assim, o custo mensal do sistema será composto por: custo dos equipamentos (sistema de biodigestor e da moto bomba) mais o custo da manutenção (troca do purificador) dividido por 180 meses. O Quadro 4 mostra os custos totais do sistema:

Quadro 4 - Custos totais do sistema de biodigestão.

ITENS	CUSTO	VIDA ÚTIL (ANOS)	CUSTO FINAL
Kit Biodigestor	R\$ 14.850,00	15	R\$ 14.850,00
Moto bomba	R\$ 900,00	5	R\$ 2.700,00
Purificador	R\$ 374,00	1	R\$ 5.610,00
CUSTO TOTAL			R\$ 23.160,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

Com base nestes resultados, na economia mensal da energia de R\$ 141,00 e na venda de biofertilizante de R\$ 200,00 a cada 3 meses (R\$ 66,67/mês) o tempo de retorno do investimento do sistema de biodigestor é de cerca de 9 anos e 3 meses.

A economia total após *Payback* é demonstrada na fórmula abaixo:

$$\text{Economia total} = 141 \times 12 \times (15 - 9,3) = \text{R\$ } 9.644,40$$

3.2 Sistema Solar Térmico

Inicialmente foi calculado a quantidade de energia necessária para o aquecimento de 1L de água. Para tanto, foi adotado, como base de cálculo, o chuveiro elétrico (marca: Corona; modelo: Banhão) com potência nominal de 6400W, 250V (220V), com eficiência energética superior a 95%, vazão de 3,0 L/min.

Para o cálculo da quantidade de energia para aquecimento foi adotado o valor mensal máximo (aumento de 27,5°C na temperatura), uma vez que o chuveiro deverá ser mais utilizado em períodos mais frios (baixa incidência solar) para aquecimento da água, que é de 27,2kWh/mês, para banhos diários de 8min, com vazão de 3L/min, segundo a Figura 21. Assim, chega-se a um valor de:

$$\text{Consumo} = \frac{27,2\text{kWh}}{\text{mês}} \times \frac{1\text{dia}}{1\text{banho}} \times \frac{1\text{mês}}{30\text{dias}} \times \frac{1\text{banho}}{8\text{min}} \times \frac{1\text{min}}{3\text{L}} = 0,0378\text{kWh/L}$$

Dessa forma, tem-se que o volume diário que se pode aquecer, com a mesma energia gerada pelo biodigestor (limitante) é de:

$$\text{Volume a ser aquecido} = \frac{170,5\text{kWh/mês}}{0,0378\text{kWh/L} \times 30\text{dias/mês}} = 150\text{L/dia}$$

Como Soletrol (2016) recomenda o uso de 1 placa de aquecimento solar para cada 100L diários de aquecimento, conclui-se que o sistema necessita de 2 placas de aquecimento solar, tendo um reservatório de volume mínimo de 150L.

O custo do sistema solar térmico foi orçado no valor de R\$ 5.807,75 pela empresa Conforto Térmico, especializada em aquecedores solares, com garantia de 2 anos. Segundo o sítio eletrônico Técnico Instalador de Sistemas Solares Térmicos (TISST) (<http://www.tisst.net/>), os sistemas solares térmicos possuem tempo de vida útil de aproximadamente 20 anos.

Com relação aos gastos com manutenção e operação, é recomendado pelo fornecedor o gasto aproximado de R\$ 200,00 por ano com a troca do ânodo, totalizando R\$ 4.000,00 durante sua vida útil. Dessa forma, o custo final do sistema será R\$ 9.807,75, conforme Quadro 5.

Quadro 5 - Custos totais do sistema solar térmico.

ITENS	CUSTO	VIDA ÚTIL (ANOS)	CUSTO FINAL
Solar Térmico	R\$ 5.807,75	20	R\$ 5.807,75
Custos de operação e manutenção	R\$ 200,00	1	R\$ 4.000,00
CUSTO TOTAL			R\$ 9.807,75

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

Considerando que o valor da economia mensal seja igual ao do biodigestor, ou seja, de R\$ 141,00 e o custo final de R\$ 9.807,75, o tempo de retorno financeiro do sistema é de aproximadamente 5 anos e 8 meses. Tendo em vista os valores acima mencionados e uma vida útil de 20 anos, a economia total após *Payback* será de R\$24.026,40.

3.3 Sistema de geração de energia através da Solar Fotovoltaica

O Módulo Fotovoltaico Canadian Solar 265 Wp é policristalino, possui aproximadamente 16% de eficiência e área de 1,6 m². Assim, o cálculo da área útil é descrito abaixo:

$$\text{Área} = \frac{\text{PB}}{\text{IR}} = \frac{170,5 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}}}{139,2 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \times \text{mês}} = 1,22 \text{ m}^2$$

$$\text{N}^\circ \text{ de placas} = \frac{1,22 \text{ m}^2}{1,6 \frac{\text{m}^2}{\text{placa}} \times 0,16} = 4,76 = 5 \text{ módulos}$$

O custo deste sistema foi orçado no valor de R\$ 19.071,00, pela empresa ECO Soluções em Energia, especializada na produção de energia através de recursos naturais renováveis, com garantia de 25 anos para os módulos fotovoltaicos, 5 anos para o inversor de

frequência e 20 anos para as estruturas de fixação. Ainda segundo a fornecedora, os gastos com manutenção e operação são praticamente nulos, portanto não foram computados neste trabalho.

Segundo Shayani, Oliveira e Camargo (2006), o tempo de vida útil de módulos fotovoltaicos é de aproximadamente 30 anos. Para o inversor de frequência e para as estruturas de fixação foram estimados os tempos de vida útil de, respectivamente, 10 e 30 anos. Dessa forma, podemos ver no Quadro 6 os valores dos custos totais deste sistema durante todo seu tempo de operação.

Quadro 6 - Custos totais do sistema fotovoltaico.

ITENS	CUSTO	VIDA ÚTIL (ANOS)	CUSTO FINAL
Módulos fotovoltaicos (6)	R\$ 6.903,00	30	R\$ 6.903,00
Inversor de frequência	R\$ 9.146,00	10	R\$ 27.438,00
Estruturas de fixação	R\$ 1.692,00	30	R\$ 1.692,00
CUSTO TOTAL			R\$ 36.033,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

Como o inversor possui vida útil estimada em 10 anos e o sistema fotovoltaico dura 30 anos, o cálculo do custo final do inversor foi o resultado da multiplicação do seu custo (R\$ 9.146,00) por 3.

O Quadro 7 mostra a produção de energia média para o sistema fotovoltaico contando com 5 módulos e tomando como base a irradiação média em cada mês. Pode-se observar que economia média mensal gerada pelo sistema será de cerca de R\$ 205,94. Assim, estima-se que o tempo de retorno do investimento será por volta de 14 anos e 7 meses.

Quadro 7 - Economia média mensal do sistema fotovoltaico.

MÊS	IRRADIAÇÃO MÉDIA (kWh/m ² .dia)	PRODUÇÃO DE ENERGIA (kWh)	ECONOMIA (R\$)
Janeiro	4,81	221,64	183,30
Fevereiro	4,95	228,10	188,63
Março	4,87	224,41	185,58
Abril	4,89	225,33	186,34
Maio	5,63	259,43	214,54
Junho	5,6	258,05	213,40
Julho	5,81	267,72	221,40
Agosto	6,43	296,29	245,03
Setembro	6,31	290,76	240,46
Outubro	5,75	264,96	219,12
Novembro	5,16	237,77	196,63
Dezembro	4,64	213,81	176,82
MÉDIAS MENSAIS		249,02	205,94

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

Considerando a economia mensal de R\$205,94, uma vida útil do sistema de 30 anos e um tempo de retorno do investimento de 14 anos e 7 meses, a economia total após *Payback* será de R\$37.810,58.

3.4 Sistema de geração de energia através da Eólica

Foi escolhida uma turbina eólica de eixo horizontal Modelo WHISPER 200, com uma potência nominal de 1000 W, peso de 30 kg, diâmetro do rotor de 2,7m, 200 kWh/mês a 5,4 m/s, velocidade bem próxima à do local de instalação.

O aerogerador escolhido possui valor de R\$ 11.190, segundo Almeida e Silva (2011). Além disso, este sistema necessita de um inversor e o escolhido foi o mesmo do sistema fotovoltaico, no valor de R\$ 9.146,00.

Os custos de aquisição e operação/manutenção totalizaram em R\$ 4.000,00. O custo total deste sistema pode ser analisado no Quadro 7.

Quadro 7 - Custos totais do sistema eólico.

ITENS	CUSTO	VIDA ÚTIL (ANOS)	CUSTO FINAL
Turbina Eólica	R\$ 11.190,00	20	R\$ 11.190,00
Inversor de frequência	R\$ 9.146,00	10	R\$ 18.292,00
Custos de aquisição e operação/manutenção	R\$ 4.000,00	20	R\$ 4.000,00
CUSTO TOTAL			R\$ 33.482,00

Fonte: Elaborado pela autora, 2016.

A economia mensal foi calculada em R\$ 296,49 e o custo total resultou em R\$ 33.482,00. Assim, o tempo de retorno financeiro do sistema é de cerca de 9 anos e 5 meses.

Considerando uma economia mensal de R\$296,49, uma vida útil do sistema de 20 anos e um tempo de retorno financeiro de 9 anos e 5 meses, a economia total após *Payback* será de R\$37.357,74.

3.5 Seleção da fonte de energia mais favorável

Na fase de estruturação, foram definidos os critérios a serem avaliados como importantes, visando chegar à melhor escolha da energia renovável.

A literatura consultada forneceu a base teórica para que os critérios fossem escolhidos e avaliados, considerando as múltiplas perspectivas que envolvem o assunto, além de possibilitar uma avaliação mais criteriosa e próxima das condições reais. Esses aspectos foram avaliados e estruturados, tendo como premissas os seguintes critérios: Custo de Aquisição; Custo de Operação/Manutenção; Tempo de retorno do investimento; Economia total após *Payback*. Os critérios foram avaliados de forma qualitativa, conforme descrito na sequência.

Todos os critérios escolhidos foram inseridos no MACBETH como "nós-critérios" com base de comparação indireta. Os níveis qualitativos foram definidos, segundo a ordem gradativa, em: "Excelente", "Muito Bom", "Bom", "Médio" e "Fraco".

Na ponderação entre os critérios, que foi realizada de acordo com a ordem de prioridade e importância estabelecida pelos autores para a escolha da energia, o custo de aquisição foi

escolhido dentre todos como o mais importante, ficando o custo de manutenção/operação em segundo, economia após *Payback* em terceiro. A escala estabelecida pelo próprio programa vai de 29.03 a 3.23, sendo a pontuação atribuída a cada um dos critérios de acordo com seu grau de prioridade para a escolha.

O custo de aquisição foi julgado como o critério mais importante na análise da decisão para a escolha da energia. A ponderação foi feita com níveis qualitativos, variando de "Excelente" a "Fraco", sendo esses os limites superiores e inferiores, respectivamente. O nível qualitativo "Excelente" possui como característica um custo de R\$0,00 a 7.400,00, já o "Muito bom" de R\$7.400,01 a R\$14.800,00, seguindo esta ordem, até chegar no nível "Fraco", com um custo de R\$29.600,01 a R\$37.000,00. A solar térmica possui um custo de aquisição de R\$5.807,00, ficando no nível "Excelente" para este critério. Já a solar fotovoltaica possui um custo de aquisição bastante elevado, mais especificamente no valor de R\$36.033,00, dessa forma foi alocada no pior nível deste critério.

O custo de manutenção/operação foi classificado como o segundo critério mais importante e sua ponderação também foi realizada no nível qualitativo, variando de "Excelente" a "Fraco". Os níveis possuem variação de R\$1.200,00, onde o melhor nível inicia em R\$0,00 e vai até R\$ 1.200,00 e o pior nível inicia em R\$4.800,01 e vai até R\$6.000,00. Diferente do Custo de aquisição, a solar fotovoltaica praticamente não possui custos de manutenção/operação, por isso foi classificada com um nível "Excelente" para este critério, enquanto que a solar térmica e eólica foram classificadas como "Médio" e o biodigestor foi o pior para este critério, ficando classificado como "Fraco".

A economia total após *Payback* possuiu julgamento qualitativo, seguindo uma ordem decrescente na variação dos valores, tendo em vista que quanto maior for a economia, mais vantajosa será a energia. Para o nível "Excelente", considerado como o melhor, a variação é de R\$32.000,01 a R\$40.000,00 e para o pior nível ("Frac"), a variação é de R\$0,00 a R\$8.000,00. Os sistemas solares fotovoltaico e eólico possuem uma economia total após *Payback* de R\$37.810, 58 e R\$37.357,74, respectivamente. Por isso, ambos foram classificados como "Excelente" para este critério.

O tempo de retorno financeiro também possui fundamental importância para este trabalho. Quanto menor for este tempo, mais pontos a energia irá ganhar. Para este julgamento, foi adotado um número inicial de 3 anos como sendo o limite superior e 15 anos como sendo o limite inferior. As diferenças de julgamento também foram ponderadas. A

medida que as ordens de prioridade vão se afastando, as diferenças de julgamento tornam-se mais agudas. Por exemplo, um tempo de retorno de 3 anos é extremamente superior a um tempo de retorno de 15 anos. A energia solar fotovoltaica possui o pior tempo de retorno financeiro de todos os sistemas avaliados neste trabalho, 14 anos e 7 meses, enquanto que a solar térmica possui o melhor, 5 anos e 8 meses.

A energia solar fotovoltaica atingiu pontuação máxima nos critérios de custo de manutenção/operação (segundo critério mais importante) e economia total após *Payback* (terceiro critério mais importante), porém possui um custo de aquisição muito elevado, considerado como o critério mais importante. A solar térmica possuiu pontuações muito altas em praticamente todos os critérios, vale ressaltar que ela só atingiu o limite superior de emissões por construção/operação devido ao fato de não ter sido determinado este valor, por isso foi computado no *software* o valor de $0tCO_{2eq}$, sendo considerado o limite superior do critério.

A energia eólica também atingiu o nível "Excelente" no critério de economia total após *Payback*, mas tiveram pontuações bem baixas nos critérios considerados como principais para este trabalho, os custos de aquisição e manutenção/operação. O biodigestor apresentou a pior pontuação nos custos de manutenção/operação, julgado como o segundo critério mais importante. Além disso, este sistema apresentou a menor economia total após *Payback*, sendo classificado no nível "Médio".

4. Conclusões

Conforme o estudo realizado, a área comum do condomínio consome cerca de 1260 kWh/mês, o que equivale a um gasto médio mensal de R\$ 1043,5.

A potência de todos os sistemas foi limitada pela quantidade de resíduos orgânicos gerados pelos moradores do condomínio, padronizando-se então, em um consumo mensal de 170,5 kWh/mês. Esta limitação foi para que todos os sistemas analisados produzam a mesma quantidade de energia e possam ser comparados de forma mais justa.

O levantamento de todos os custos de aquisição e manutenção/operação foi realizado com base em pesquisas bibliográficas e/ou consultas com empresas especializadas em cada área específica. Os custos dos sistemas totalizaram em: biodigestor R\$ 23.160,00, solar

fotovoltaico R\$ 36.033,00, solar térmico R\$ 9.807,75 e eólico R\$ 33.482,00, onde o sistema solar térmico apresentou o menor custo total e o solar fotovoltaico o maior.

O tempo de retorno financeiro foi calculado através da divisão dos custos totais de cada um dos sistemas, pela economia mensal relativa ao consumo de energia oriundo da concessionária. Para o biodigestor o tempo de retorno financeiro foi calculado em 9 anos e 3 meses, para a solar fotovoltaica em 14 anos e 7 meses, para a solar térmica em 5 anos e 8 meses e para a eólica em 9 anos e 5 meses. O sistema solar térmico apresentou o menor tempo e a solar fotovoltaica o maior.

O sistema solar térmico foi selecionado como o mais favorável para o conjunto habitacional avaliado através do *software* MACBETH, tendo em vista que possui o menor custo de aquisição, o menor tempo de retorno financeiro, uma economia total após *Payback* elevada (R\$24.026,40). Os critérios de avaliação determinados para este estudo foram os seguintes: Custo de Aquisição; Custo de Operação/Manutenção; Tempo de retorno do investimento; Economia total após *Payback*.

5. Referências

ALMEIDA, A. T. P.; SILVA, M. M. Desenvolvimento e Montagem de um Gerador Eólico com Pás Compósitas. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Energia Eólica**. 2015. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf)>. Acesso em: 15 de abr. 2017.

BARBOSA, G. M. C; FILHO, J. T.; BRITO, O. R.; FONSECA, I. C. B. Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade do milho safrinha. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, n. 3, p. 601-605, 2007.

BERNARDI, C. C. Reuso de Água para Irrigação. 52 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada, Isea-fgv/ Ecobusiness School, Brasília, 2003.

BERMANN, C. Energia no Brasil: Para Quê? Para Quem? Crise e Alternativas para um País Sustentável. São Paulo, SP: Editora Livraria da Física, 2002.

CARREAS, N. O Biogás. 2013. Disponível em: <<http://www.renenergyobservatory.org/>>. Acesso em: 28 de abr. 2016.

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. Bioresource technology, v. 101, n. 11, p. 4021-4028, 2010.

FERNÁNDEZ, J.; PÉREZ, M.; ROMERO, L. I. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource technology*, v. 99, n. 14, p. 6075-6080, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>. Acesso em: 15 de set. 2017.

LOUREIRO, A.B.; SANTANA, A.G.; FREITAS, G.A.; PARIS, R.A. **Sistema de Apoio à Decisão**. 2016. Disponível em: <<http://www.devmedia.com.br/sistema-de-apoio-a-decisao/6201>>. Acesso em: 16 de fev. 2017.

MITZLAFF, K. Engines for biogas. German Appropriate Technology Exchange (GATE), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 1988.

PVWATTS. Fortaleza. Disponível em: <<http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>>. Acesso em: 07 de abr. de 2016.

SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G.; CAMARGO, I. M. T. Comparação do Custo entre Energia Solar Fotovoltaica e Fontes Convencionais. *V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, CBPE. Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio, 31/maio-02/junho/2006. Brasília, DF.

SOLETROL. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/>>. Acesso em: 16 de mar. 2016.

TISST (Técnico Instalador de Sistemas Solares Térmicos). **Energia Solar Térmica TISST**. 2016.

Disponível em: <<http://www.tisst.net/introdu%C3%A7%C3%A3o/>>. Acesso em: 16 de mai.

2017.