

# Viabilidade econômica e ambiental da utilização de energia solar em estações de tratamento de água e esgoto de Palmas-TO

Economic and environmental feasibility in the use of solar energy in water and sewage treatment station

Jefferson Martins Oliveira<sup>1</sup> , Juan Carlos Valdés Serra<sup>1</sup> ,  
Joel Carlos Zukowski Junior<sup>1</sup> , Alex Vilarindo Menezes<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas, TO, Brasil. E-mails: jefferson.martins@mail.uft.edu.br, juancs@uft.edu.br, zukowski@mail.uft.edu.br, vilarindo@mail.uft.edu.br

Como citar: Oliveira, J. M., Serra, J. C. V., Zukowski Junior, J. C., & Menezes, A. V. (2022). Viabilidade econômica e ambiental da utilização de energia solar em estações de tratamento de água e esgoto de Palmas-TO. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e20. <https://doi.org/10.21168/rega.v19e20>

**RESUMO:** O estabelecimento de políticas de expansão do saneamento no país tem provocado o avanço nos serviços, em paralelo a esse avanço tem-se a intensificação da degradação de afluentes e a escassez hídrica, situações estas que implicam que as prestadoras de serviços efetuem mudanças no processo de tratamento ou optem por fontes de recursos hídricos com maior qualidade, no entanto a adoção dessas estratégias infere aumentos nos gastos de energia, tornando o tratamento mais dispendioso. Propõem-se, então, o estudo da avaliação da viabilidade econômica e ambiental de sistemas de energia solar em estações de tratamento de água e esgoto. O estudo faz uso dos índices de consumo de energia de estações de tratamento de água e esgoto, em suprir os consumos parciais ou integrais, contrastando a sua viabilidade para as estações estudadas. A solução é defendida por apresentar índices excelentes de viabilidade econômica e ambiental, devido ao médio prazo de retorno do investimento e pelo alcance de 83,32% a 98,85% de redução no faturamento mensal de consumo de energia, bem como a baixa representatividade de impactos ambientais, proporcionando ganhos reais do investimento.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética; Universalização; Payback; Energia Solar; Estações de Tratamento.

**ABSTRACT:** The establishment of policies for the expansion of sanitation in the country has led to the advance in services, in parallel to this advance, there is an intensification of the degradation of tributaries and water scarcity, situations that imply that service providers make changes in the treatment process or opt for sources of water resources with higher quality, however, the adoption of these strategies infers increases in energy expenditures, making treatment more expensive. It is proposed, then, the study of the evaluation of the economic and environmental viability of solar energy systems in water and sewage treatment plants. The study makes use of the energy consumption indexes of water and sewage treatment plants, in supplying partial or integral consumption, contrasting their viability for the studied stations. The solution is defended by presenting excellent rates of economic and environmental viability, due to the medium term of return on investment and the achievement of 83.32% to 98.85% reduction in monthly energy consumption invoicing, as well as the low representativeness of environmental impacts, providing real gains in investment.

**Keywords:** Energy Efficiency; Sanitation; Solar Photovoltaic System; Economy.

## 1 INTRODUÇÃO

As fontes de energias renováveis tornaram-se uma ótima alternativa para suprir a demanda energética, adquirindo destaque nas políticas públicas do setor, como solução para diminuir a dependência de fontes termoelétricas no mundo, favorecendo, então, as gerações distribuídas, principalmente em setores que consomem grande quantidade de quilowatts de energia, com presença nas residências urbanas e em empreendimentos rurais. No entanto, mesmo com a expansão registrada

Recebido: Fevereiro 23, 2022. Revisado: Setembro 07, 2022. Aceito: Novembro 01, 2022.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

ao longo dos anos, esse modelo de produção ainda possui baixa representatividade no setor elétrico (Camargo, 2017).

Na visão de Andrade Sobrinho & Borja (2016), a eficiência energética nos sistemas de água e esgoto é um imperativo, da qual é preciso propor para o Brasil a adição de esforços na concepção dos projetos, em razão do caráter ambiental, social e econômico. O fundamento do aproveitamento energético se insere nos esforços da sustentabilidade, com vistas a um maior equilíbrio entre ambiente, economia e sociedade. No entanto, no caso brasileiro, o setor energético tem enfrentado desafios que estão relacionados à escassez hídrica, ao uso da energia de termoeletricas, e ao consequente aumento tarifário. Para atenuar esses efeitos adversos, o governo brasileiro estabeleceu políticas públicas de sustentabilidade energética que incentivam a utilização de fontes alternativas, que se alavancaram com a crise do petróleo na década de 70, da qual grande parte do mundo, inclusive o Brasil, passou por dificuldades econômicas e energéticas, uma vez que em sua matriz havia a predominância de derivados desse composto.

Os registros históricos da Aneel (Brasil, 2016), apontam que o estabelecimento de políticas no setor de energia, resultaram na elevação da participação da energia solar na matriz energética nacional, que passou de 3 em 2012 para 6.670 em 2016 de conexões acumuladas de unidades de gerações distribuídas de energia solar, representado 60.895 kW de produção de energia (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2014). No entanto, esse crescimento não é expressivo em setores essenciais como o saneamento básico, no qual o consumo de eletricidade é indispensável para alcançar a universalização, já que o setor apresenta elevados valores em gastos com eletricidade, sendo indispensáveis o uso discriminado, situação evidenciada no diagnóstico constantes no SNIS (Brasil, 2016), que registrou as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de abastecimento de água e esgotamento sanitário em R\$ 5,41 bilhões, ao qual representa 11,8 TWh, sendo 10,6 TWh com abastecimento de água e 1,2 TWh com esgotamento sanitário, ressaltasse que os custos apresentados seriam maiores se não houvesse os descontos de 15% concedido ao setor e a isenções de ICMS por serviços públicos estaduais.

Logo, os esforços para alcançar a eficiência energética no setor de saneamento refletem custos evitáveis e que são suportados por subsídios governamentais e por taxas e tarifas cobradas dos usuários. Nessa perspectiva, a economia alcançada na gestão energética oportuniza, por exemplo, a aplicação desses recursos economizados na ampliação dos sistemas (Brasil, 2016). Na ótica ambiental, essa situação provoca a emissão de gases de efeito estufa desnecessários com impactos que acarretam alterações climáticas em abrangência global.

Esse cenário é abordado por Andrade Sobrinho & Borja (2016), ao afirmarem que a crescente demanda por água e a intensificação da degradação ambiental impulsionaram no Brasil práticas de uso racional e controle de perdas em sistemas de abastecimento. No entanto, os esforços concentram-se no volume de água perdido, desconsiderando a eficiência energética.

No entendimento de Chernicharo et al. (2018), os compromissos assumidos pelo Brasil para universalização do saneamento básico representarão a elevação do consumo de energia para o alcance das metas de universalização prevista no Plano Nacional de Saneamento Básico (Ministério das Cidades, 2014), cujo índices de tratamento no Brasil é de 90% alcançável até 2033.

Para Balfour et al. (2016), a análise econômica e ambiental, ao considerar os aspectos de que os sistemas fotovoltaicos não emitem poluentes, e que a sua fonte de produção de energia é inesgotável, não são indicativos que são suficientes e necessárias para a definição da sua viabilidade, a avaliação deve ponderar cada possível local e sistema.

Existem fatores que afetam a adequabilidade de um local para instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede e que devem ser considerados na análise econômica e ambiental da alternativa, que incluem a disponibilidade de recurso energético, as implicações da existência de sombreamento por árvores, montanhas ou outros objetos que ocasionam sombra, dessa forma as implicações provocadas por estes fatores devem ser previstas. No Brasil, outra variável a ser considerada é o custo envolvido que é prioritariamente relevante, sendo os sistemas de energia solar fotovoltaica reconhecidos por apresentarem baixo custo de funcionamento, baixo custo de manutenção e inspeção de rotina, no entanto, o aporte inicial de investimento é quase sempre maior que o benefício monetário oferecido pelas prestadoras de energia elétrica. Sobre esses valores podem ser abatidos, ainda, a alíquota de imposto ou incentivos, e, também, há que culminar a incidência do custo corrigido pela inflação da energia fornecida pelas concessionárias ao longo do tempo. Arelado a esse cenário, é oportuno contrastar a totalidade dos fatores levantados que impactam e causam a diminuição do custo de investimento com todas as suas despesas ao longo do tempo (Balfour et al., 2016).

Em vista ao panorama e projeções descritas propõem-se o estudo de viabilidade da utilização de energia solar para suprir as demandas dos processos e operações de estações de tratamento de água e esgoto, o estudo é subsidiado pelo contraste entre os custos de implantação e a subtração dos incentivos governamentais, auferindo as vantagens e desvantagem atribuídas ao setor com a implantação de sistemas de produção de energia solar fotovoltaica.

## **2 METODOLOGIA**

A proposta tem como escopo analisar a viabilidade econômica e ambiental de um sistema de energia solar fotovoltaica que atenda as demandas energéticas de estações de tratamento de água e esgoto, bem como identificar áreas devolutas de domínio das prestadoras de serviços de abastecimento de água e esgoto que os comportem.

A metodologia consiste na quantificação dos consumos de energia das estações de tratamento do município de Palmas/TO, comparando-os com os parâmetros de disponibilidade de área e custos de investimento, para suprir os consumos parciais ou integrais das estações de tratamento de água e esgoto.

As viabilidades encontradas para as estações de tratamento de água e esgoto servirão como parâmetro de comparação, na tentativa de avaliar qual das operações, se água ou esgoto, é mais favorável a receberem o Sistema de produção de energia solar fotovoltaica. Assim, os esforços empenhados nas análises qualitativas e quantitativas estabelecidas, propiciam a produção de diferentes alternativas de viabilidade e de período de retorno econômico.

A abordagem metodológica é referenciada por Camargo (2017), Mitidieri (2017) que desenvolveram estudos correlatos de viabilidade de Sistemas de Produção de Energia Solar. Suas considerações direcionam os modelos de dimensionamento do projeto e ponderam a escolha dos componentes dos sistemas. A escolha dos componentes do SFCR foi definida em vista ao alcance do maior rendimento possível de produção e vida útil do sistema, quanto ao estabelecimento dos requisitos, estes foram elaborados em consonância as análises e as conclusões demonstradas por Balfour et al. (2016), a partir das suas premissas foi possível projetar o layout do sistema, sua composição e a alocação dos seus componentes.

Na concepção do SFCR foram escolhidas, em primeira instância, as quatro estações de tratamento de água e esgoto objetos de aplicação, a escolha das estações de tratamento de água e esgoto levou em consideração o atendimento de aspectos que se assemelham entre as estações de tratamento de água e esgoto, sendo a capacidade operacional dos processos e operações unitárias do tratamento empregado.

Esses critérios são os requisitos fundamentais na definição das etapas posteriores da metodologia, da qual envolvem os consumos energéticos, a definição da potência do sistema, a delimitação da área requerida para a instalação do sistema e a área útil disponível nas estações.

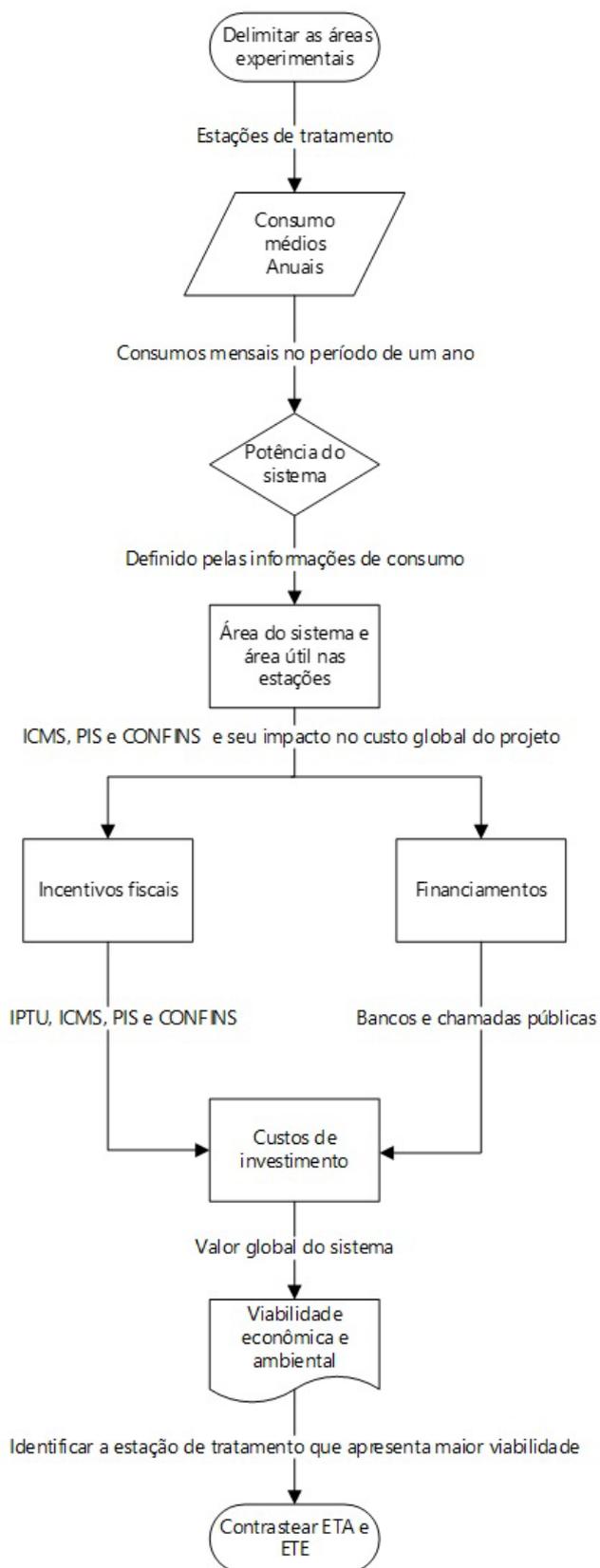
As estações de tratamento de água e esgoto avaliadas são da cidade de Palmas, capital do Estado do Tocantins, a sua escolha é justificada pela concentração na cidade de empresas especializadas em projetos de instalação de sistemas de produção de energia solar fotovoltaica, pelos incentivos estabelecidos pelo poder público municipal para a atividade e pelo elevado potencial local de aproveitamento energético.

Conforme considera Balfour et al. (2016), as cargas dos sistemas ligados à rede de distribuição de energia geralmente são calculadas usando os últimos 12 meses das faturas de eletricidade existentes. Porém, optou-se em estimar as cargas com o produto do índice de gasto de energia elétrica por metro cúbico produzido e o volume total de água e efluente tratado produzido, informações disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Como componentes do dimensionamento tem-se a determinação da área demandada para instalação dos painéis fotovoltaicos e os abatimentos de incentivos fiscais. Para determinar o volume de energia produzido e para o estabelecimento do tamanho da área necessária para a implantação dos painéis solares serão utilizados os modelos adotados por Camargo (2017).

A metodologia pode ser explicada pelos fluxos de informações requeridas para o estudo, a sua síntese é observada no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Síntese da metodologia



Fonte: Camargo (2017), adaptado.

## 2.1 Irradiação solar

As fontes de informações sobre a incidência de radiação solar local foram auferidas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) na publicação do Atrás Solar do Brasil e ainda pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB).

A posição e inclinação local do Sol podem ser determinadas diretamente no Cresesb, que registra uma média diária mensal de irradiação solar de  $5,31 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ , com o ângulo de inclinação do módulo de  $10^\circ$  em referência ao plano horizontal. Na Tabela 1 são demonstradas as médias mensais diárias de irradiação solar em Palmas - TO.

**Tabela 1** - Irradiação incidente em Palmas - TO

Ângulo	Irradiação solar diária média mensal [ $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$ ]	
	Inclinação	Média
Plano Horizontal	$0^\circ \text{ N}$	5,22
Ângulo igual a latitude	$10^\circ \text{ N}$	5,31
Maior média anual	$13^\circ \text{ N}$	5,31
Maior mínimo mensal	$5^\circ \text{ N}$	5,28

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2018).

A Tabela 2 expõe os quantitativos registrados no ano de 2017 de radiação solar e sua conversão em produção de energia.

**Tabela 2** - Potencial energético do recurso solar

RECURSO SOLAR NO PLANO HORIZONTAL				
Período	Radiação Solar ( $\text{MJ/m}^2$ )		Produção de Energia ( $\text{MJ/m}^2$ )	
	Diário	Mensal	Diário	Mensal
Janeiro	18,51	573,81	49,995	1549,837
Fevereiro	18,48	517,44	49,894	1397,024
Março	17,49	542,19	47,199	1463,155
Abril	17,83	534,28	48,099	1442,971
Mai	17,88	554,28	48,224	1494,942
Junho	18,12	543,6	48,868	1466,034
Julho	18,88	585,28	50,922	1578,591
Agosto	21,39	663,09	57,696	1788,573
Setembro	20,58	617,4	55,527	1665,813
Outubro	19,45	602,95	52,502	1627,548
Novembro	18,49	554,7	49,937	1498,108
Dezembro	18,32	567,92	49,492	1534,251

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, INPE (Pereira et al., 2006).

Uma segunda opção é a defendida por Villalva & Gazoli (2012), citado por Camargo (2017), que recomenda a definição do ângulo de inclinação dos painéis conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** - Escolha do ângulo de inclinação do módulo

ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DO MÓDULO	
Latitude geográfica do local	Ângulo de inclinação recomendado
$0^\circ$ a $10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$11^\circ$ a $20^\circ$	$\alpha = \text{latitude}$
$21^\circ$ a $30^\circ$	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
$31^\circ$ a $40^\circ$	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
$41^\circ$ ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Villalva & Gazoli (2012).

Conforme a Tabela 3, o ângulo recomendado para a cidade de Palmas - TO, para latitudes entre  $0^\circ$  e  $10^\circ$ , equivale ao valor da latitude, orientando-o com sua face voltada para o norte geográfico. Essa orientação melhora o aproveitamento da luz solar ao longo do dia, pois há a incidência de raios solares sobre o módulo durante todo o dia, com valor máximo ao meio-dia solar [Villalva et al. (2012) citado por Camargo (2017)].

Com o mérito de imbuir ao estudo resultados mais próximos possíveis da realidade da localidade, optou-se em adotar os índices de radiação utilizados pela Empresa Aldo Componentes Eletrônicos LTDA, que as define em 4,62 kWh/m<sup>2</sup>, esse valor é baseado no mapa de radiação global horizontal média anual do Brasil.

## 2.2 Demanda energética das estações e potência do sistema

As estações de tratamento de água e esgoto escolhidas para o dimensionamento do sistema foram selecionadas pelos critérios de menor discrepância entre as capacidades instaladas de produção, sendo, portanto, estações com capacidades operacionais equivalentes e que são enquadradas como sistemas menores, por esse motivo essas estações de tratamento de água e esgoto não preveem futuras ampliações dos sistemas de tratamento. Referente a essas estações o Plano Diretor de Saneamento Básico de Palmas-TO determina que esses sistemas, considerados estações de tratamento menores estão sendo mantidas apenas para eventuais necessidades emergenciais ou operacionais. Em atendimento a esses critérios, foram selecionadas as estações de tratamento de água: ETA 003, Água Fria, ETA 005 e Brejo Comprido, e, para as estações de tratamento de esgoto: ETE Compacta 001 e 002. As capacidades de produção das estações supracitadas são definidas na Tabela 4.

**Tabela 4** - Definição dos objetos de estudo

SISTEMAS AVALIADOS				
Estação de tratamento	ETA 003	ETA 005	ETE compacta 001	ETE compacta 002
Capacidade	100 L/s	100 L/s	20 L/s	20 L/s

Fonte: Autor, 2019.

Quanto à capacidade foram utilizadas as estimativas do consumo de energia elétrica das estações, que é calculado pelo produto do coeficiente de gasto de energia por metro cúbico e o volume total mensal de água e efluentes tratados produzidos. Sendo considerado no cálculo uma operação nas estações em condições intermitente e em sua máxima capacidade. Dessa forma, o gerador fotovoltaico foi dimensionado com capacidade para suprir 25% dos consumos das estações de tratamento, definido como o índice mínimo para a concessão de desconto pela Prefeitura de Palmas -TO sobre o IPTU. Os registros dos índices de consumo de energia elétrica para as estações de tratamento de água e esgoto e os consumos individuais das estações de tratamento estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** - Informações para a estimativa da potência do sistema

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA				
Estações de tratamento	Índice de consumo de energia	Produção diária	Consumo	Capacidade nominal do SFCR
ETA 003	0,56	8.640 m <sup>3</sup>	4.838,4 kWh/dia	1209,6 kWh/dia
ETA 005	0,56	8.640 m <sup>3</sup>	4.838,4 kWh/dia	1209,6 kWh/dia
ETE Compacta 001	0,31	1.728 m <sup>3</sup>	503,7 kWh/dia	125,925 kWh/dia
ETE Compacta 002	0,31	1.728 m <sup>3</sup>	503,7 kWh/dia	125,925 kWh/dia

Fonte: Autor, 2019.

A produtividade anual do SFCR para a cidade de Palmas – TO, utilizada no estudo, foi definida por Menezes & Daniel (2016) em seus estudos de SFCR, com diferentes configurações, o autor estimou uma produtividade de 1.410 kWh/Wp.

Por apresentarem a mesma capacidade de produção, e conseqüentemente consumos aproximados de energia elétrica, o sistema de energia solar projetado para Estações de Tratamento de água e de esgotos tem viabilidade econômica e ambiental iguais, no entanto as análises de disponibilidade de áreas exprimem resultados distintos.

## 2.3 Definição do módulo solar fotovoltaico

Como requisito ao dimensionamento do sistema é preciso definir o módulo solar fotovoltaico. O modelo escolhido foi o Canadian CSI CS6K-270P. Esse modelo foi recomendado por Camargo (2017), em face das características do módulo, a saber a sua composição, de material de silício policristalino, com rendimento de 16,5%, tendo equivalência ao de silício monocristalino, porém, a um preço mais acessível.

As características apresentadas por Camargo (2017) convergem com as especificações técnicas da Tabela 6 que descrevem as informações apresentadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO no Programa Brasileiro de Etiquetagem com ano de referência de 2017.

**Tabela 6** - Características do módulo solar fotovoltaico

Informações do módulo						
Marca	Modelo	Material	Área	Potência	Eficiência energética	Classificação
Canadian	CS6K - 270P	Si-Poli	1,64 m <sup>2</sup>	270 Wp	16,5%	A

Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2018.

Na estimativa da energia elétrica produzida diariamente por um módulo foi empregado a Equação 1.

$$E_m = A \cdot \eta \cdot E_s \quad (1)$$

As especificações das variáveis da equação são definidas como:  $E_m$  é a energia produzida diariamente por um módulo (kWh/dia);  $A$  é a potência do módulo ( $W_p$ );  $\eta$  é a eficiência do módulo; e  $E_s$  é a insolação local (kWh/dia). Como resultado do cálculo foi obtido o valor equivalente de:

$$E_m \approx 1,25 \text{ kWh/dia}$$

As especificações técnicas contidas na Tabela 6, em consonância a potência do sistema, determinado pelos consumos médios das estações, definidos nos itens anteriores, são parâmetros para o cálculo do número de módulos ( $N_M$ ) do SFCR. Sendo as variáveis identificadas da seguinte forma, sendo  $N_M$  o número de módulos utilizados, definido pelo quociente entre a capacidade nominal do Gerador ( $E_G$ ) e a energia produzida por módulo ( $E_M$ ), assim descrito pela Equação 2:

$$N_M = \frac{E_G}{E_M} \quad (2)$$

E a potência instalada ( $P_{ins}$ ) é definida pelo produto do número de módulos ( $N_M$ ) pelo potencial nominal dos módulos ( $P_m$ ), conforme é apresentado pela Equação 3.

$$P_{ins} = N_M \cdot P_m \quad (3)$$

#### 2.4 Área de instalação do SFCR

Para a quantificação da área útil das estações de tratamento, foram estabelecidos critérios que orientaram a sua definição, esses critérios delimitaram as áreas que estavam aptas a instalação dos SFCR com base nas características que influenciam o desempenho do sistema. Apesar do dimensionamento da área, Camargo (2017) aponta os principais aspectos influentes, sendo, o sombreamento, temperatura do módulo e o desvio no seu rendimento nominal. Devido a sazonalidades da radiação durante o dia, este último, a saber o rendimento nominal, é determinado com a inclinação e orientação de instalação dos módulos que na grande maioria dos casos, os fotovoltaicos são instalados de acordo com o telhado dos estabelecimentos, o que nem sempre obedece às orientações técnicas listadas anteriormente, comprometendo a eficiência do sistema.

Em conformidade com as especificações do módulo utilizado foram consideradas para a temperatura de operação nominal das células fotovoltaicas os valores de  $45 \pm 2^\circ\text{C}$ , representado uma perda na eficiência do módulo de 0,41% para cada grau de temperatura aumentado.

No cálculo da área nominal demandada pelo SFCR foi preciso estabelecer um valor médio de eficiência dos módulos fotovoltaicos comerciais. Rosa & Santos (2016) citado por Camargo (2017) adotaram o coeficiente de 16,79%; no entanto, para o caso em estudo será utilizada a eficiência registrada pelo Inmetro de 16,5%, fornecendo uma potência por módulo de 270W. Dessa forma, a área nominal para a instalação do sistema solar fotovoltaico é o produto da multiplicação do número de módulo ( $N_M$ ) pela sua área ( $A_{Nominal}$ ) e pelo índice de previsão de áreas para a fiação, ventilação e para a movimentação nas operações de manutenção, definido por método empírico, conforme a seguinte relação matemática:

$$A_{Nominal} = N_M \cdot A_{Módulos} \cdot 1,2 \quad (4)$$

Com a resolução da Equação 4, a área necessária para a instalação dos módulos foi de 1.905 m<sup>2</sup> para ETA e 199 m<sup>2</sup> para ETE. A diferença encontrada está atrelada à diferença nos consumos de energia, especificado na Tabela 5, que responde pela definição da potência a ser instalada e consequentemente pela quantidade de módulos.

## 2.5 Inversor

Na escolha do inversor Rüter (2004) e Balfour et al. (2016) admitem dois pontos importantes: a eficiência e a qualidade da energia gerada. Em relação à eficiência, os autores sugerem a utilização de um conjunto de módulos com potência total superior à potência máxima do inversor, entendendo que o diferencial de 1% da sua eficiência pode resultar no aumento de 10% de energia elétrica gerada em um ano. Assim, é necessário associar esse conceito a definição da forma como os módulos fotovoltaicos estarão dispostos, cuidando para que o percentual de potência aplicado na entrada do inversor seja superior à sua potência nominal. Nesse aspecto Macedo (2006), ao abordar o assunto, também demonstrou que a máxima eficiência dos inversores se encontra entre 40 e 50% da sua potência nominal.

Ainda sobre, Balfour et al. (2016) admite que para satisfazer a máxima potência do inversor é preciso usar a regra dos 80%. A exemplo, no caso de um inversor de 10.000 watts, este permite que 8.000 watts sejam ligados a ele, sendo é essencial manter-se próximo desse percentual, a fim de melhorar o desempenho e ampliar a vida útil do inversor. Quanto ao anti-ilhamento, este impede a saída de energia por parte do sistema de geração quando a rede está sendo submetida a manutenção, evitando eventuais acidentes aos operadores.

Rüter (2004) observa ainda que a baixa qualidade da energia no ponto de conexão com a rede elétrica, pode ocasionar o não funcionamento dos inversores, havendo, então, à necessidade de analisar a qualidade da energia elétrica no ponto onde se pretende fazer a conexão do inversor à rede elétrica. Quanto a isso, os fabricantes de inversores destacam como parâmetros de análise da rede elétrica a faixa de tensão CA, a frequência e a impedância.

## 2.6 Dispositivos de segurança e de proteção e cabeamento

Os elementos de segurança e proteção são dimensionados em conformidade com a máxima tensão do inversor, da qual envolvem as caixas de junção. Sua função é armazenar e proteger as conexões dos módulos fotovoltaicos e os dispositivos de proteção usados nos circuitos. Os dispositivos de proteção comumente utilizados nesse tipo de instalação são medidas preventivas contra surto e disjuntores, tanto para a parte de corrente alternada quanto para a de corrente contínua do circuito.

Camargo (2017), considera que os sistemas de microgeração e minigeração, para simplificar a utilização, os fabricantes de módulos padronizaram a seção dos condutores. Assim, pode-se utilizar a seção de cabeamento determinada pelo fabricante, no caso do módulo empregado essa seção é de 4 mm<sup>2</sup>.

## 2.7 Incentivos fiscais

O Decreto municipal nº 1.506, de 18 de dezembro de 2017, dispõe sobre a concessão de desconto no IPTU aos imóveis do município de Palmas-TO, sendo que nos artigos 2º e 8º são definidos, respectivamente, o modelo de cálculo e as porcentagens de desconto, atribuídos conforme os resultados de Índice de Aproveitamento de Energia Solar (IAES). O modelo de cálculo está atrelado ao conceito do IAES, sendo determinado pelo quociente da Potência Instalada (PI) e Demanda Contratada (DC) para o grupo de tensão A (TA), já no grupo B (TB) às variáveis empregadas são a Geração Média Mensal (GMM) e o Consumo Médio Mensal (CMM), o modelo de cálculo e as porcentagens de desconto apresenta-se da seguinte forma:

$$IAES(TA) = \frac{PI}{DC} \quad (5)$$

$$IAES(TB) = \frac{GMM}{CMM} \quad (6)$$

A concessão de desconto apresentada na Tabela 7 é válida para as operações que alcançarem valores de IAES entre 1 e 0,25. O artigo 3º do Decreto determina que o incentivo fiscal de IPTU será concedido ao beneficiário por até cinco anos, contados do ano seguinte ao requerimento e fixado de acordo com o período da concessão, conforme preceitua o § 1º do art. 14 e o art. 26, da Lei Complementar

nº 327, de 2015, da qual prevê a regressão dos índices de incentivos e benefícios. Os períodos de 2016 a 2020 são os que apresentam maiores índices de incentivos, sendo respectivamente 100% e 80%.

**Tabela 7** - Percentagem de descontos sobre o IPTU no município de Palmas-TO

IAES (TB)	Desconto
Igual a 1	80%
Menor que 1 ou maior ou igual a 0,75	65%
Menor de 0,75 ou maior que 0,50	50%
Menor que 0,50 e maior que 0,25	35%

Fonte: Prefeitura de Palmas, 2019.

A Nota Técnica nº 115/2005-SFF/SRE/ANEEL expõem a metodologia aplicada na apuração das alíquotas de PIS e Confins, o valor é apurado sobre as Receitas e Créditos mensais, os registros das alíquotas vigentes no período do mês de outubro de 2017 a setembro de 2018 no estado do Tocantins são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8** - Alíquotas PIS e Confins definidas pela Aneel

PIS e Confins			
Ano	Mês	Alíquota de PIS	Alíquota de Confins
2018	Setembro	0,90	4,17
2018	Agosto	1,08	5,00
2018	Julho	1,08	5,00
2018	Junho	0,29	1,35
2018	Maio	1,40	6,44
2018	Abril	1,05	4,86
2018	Março	0,47	2,15
2018	Fevereiro	0,34	1,56
2018	Janeiro	0,27	1,26
2017	Dezembro	0,86	3,94
2017	Novembro	1,41	6,51
2017	Outubro	1,26	5,78

Fonte: Energisa, 2019.

As alíquotas para PIS e Confins registradas na tabela não apresentam homogeneidade, pelo contrário possuem elevada variabilidade, que é explicada pelas variáveis que compõem a sua estrutura de cálculo.

O incentivo fiscal admitido pela Lei nº 13.169, de 6 de outubro de 2015 em seu artigo 8º isenta o PIS e Confins sobre a diferença positiva entre a energia consumida e a injetada na rede. Para o ICMS é estabelecido a mesma regra que no PIS e Confins, é importante ressaltar que o imposto não é cobrado sobre os consumos dos serviços públicos estaduais.

## 2.8 Financiamentos

A Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000 no artigo 1º impõe as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica a aplicação de percentual de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico, e em programas de eficiência energética.

De acordo com a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, as empresas de serviços públicos de distribuição de energia elétrica são obrigadas a aplicar, anualmente, o valor equivalente a 0,50% (zero vírgula cinquenta por cento) de sua receita operacional líquida - ROL no desenvolvimento de programa para o incremento da eficiência energética no uso final de energia elétrica, através de projetos executados em instalações de consumidores. (Brasil, 2000).

Esses editais de chamadas públicas para implementação de projetos de eficiência energética ocorrem uma vez ao ano com a publicação de editais de seleção de projetos. No estado do Tocantins a concessionária vem comumente lançando o edital no segundo semestre do ano. Há também que

explicitar as linhas de créditos específicas para financiamentos de projetos de sistemas de produção de energia fotovoltaica, oferecidas pelas instituições bancárias, em respostas ao fomento do governo na expansão da atividade. A Tabela 9 elenca as linhas de financiamentos.

**Tabela 9** - Linhas de financiamentos

FINANCIAMENTOS				
Instituição	Financiamento	Limites	Taxa de Juros	Prazo
Caixa econômica Federal	Até 100%	Não fixado	Não informado	60 meses
Banco do Brasil	Até 80%	Até R\$ 1 milhão	Variável	72 meses
BASA	De 65 a 100%	Até 120 milhões		Até 12 anos
Bradesco	Até 70%	Não informado	Não informado	De 36 a 60 meses
BV	100%	Não fixado	1,48% a. a	60 meses
Santander	100%	Não fixado	0,99% a. a	60 meses

**Fonte:** Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2022.

## 2.8 Orçamento

O levantamento dos custos de investimento para o projeto fora estimado considerando o preço médio dos sistemas fotovoltaicos, em R\$/Wp. Os valores de referência considerados foram publicados em 2017 pelo Instituto IDEAL da América Latina. Desta forma, o valor médio dos SFCR acima de 100 kWp no país é de 4,60/Wp, sendo que no intervalo de potência entre 6 até 30 kWp o preço médio é de 6,02/Wp. Assim, o custo de investimento é o produto da potência instalada pelo valor médio, esses custos para cada estação são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10** - Investimento do projeto

ESTIMATIVA DO CUSTO DE INVESTIMENTO		
Estações de tratamento	Potência instalada	Investimentos
ETA 003	261,36 kWp	R\$ 1.202.256,00
ETA 005	261,36 kWp	R\$ 1.202.256,00
ETE Compacta 001	27,27 kWp	R\$ 164.165,00
ETE Compacta 002	27,27 kWp	R\$ 164.165,00

**Fonte:** Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina, 2018.

Os equipamentos e estruturas envolvidos aos sistemas fotovoltaicos são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11** - Infraestruturas e custos

EQUIPAMENTOS	CUSTOS (%)
Módulos	38
Inversor	21
Projeto e instalação	14
Estruturas metálicas e suporte	10
Administrativas	10
Dispositivos de Proteção e condutores	7

**Fonte:** Camargo (2017).

Pela Tabela 11 observa-se que os maiores custos de investimentos estão na aquisição dos módulos e inversores, importando considerar a avaliação do ciclo de vida desses produtos, de forma que sejam identificados os fatores que inferem no seu desempenho e durabilidade e que são determinantes na previsão da necessidade de manutenções.

## 2.9 Perdas

Inúmeros fatores alteram o desempenho global dos sistemas, dos quais é essencial o seu levantamento quando se está projetando o SFCR, permitindo que o sistema possa lidar com a carga demandada. Balfour et al. (2016) elenca como fatores que afetam o rendimento dos sistemas, as Condições de Teste-Padrão, Classificação PTC, temperatura, poeira e sujeira, incompatibilidade e fiação, conversão CC/AC; considera-

se ainda a depreciação apontada pelos fabricantes dos módulos que informam uma vida útil estimada de mais de 25 anos e degradação da produção devido ao envelhecimento de 0,8% ao ano, a reunião das perdas e seus respectivos índices são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12** - Previsão de perdas

FATORES DE PERDAS	
Sombreamento totais	Percentuais
Aumento de temperatura	9,4%
Descasamento	5,0%
Corrente continua	1,5%
Outros	5,0%
Conversão	3,3%
Perdas totais	22,2%

Fonte: Camargo (2017).

Na Tabela 13 são apresentados os valores da potência, considerando as perdas elencadas na Tabela 12.

**Tabela 13** - Número de módulos fotovoltaicos do sistema

MÓDULOS FOTOVOLTAICOS		
Estações de Tratamento	Número de módulos	Potência instalada
ETA 003	968	203,34 kW
ETA 005	<b>968</b>	<b>203,34 kW</b>
ETE Compacta 001	101	21,22 kW
ETE Compacta 002	<b>101</b>	<b>21,22 kW</b>

Fonte: Autor, 2019.

## 2.10 Viabilidade econômica

A viabilidade do sistema é expressa pelo Payback descontado, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno de forma a mensurar os benefícios obtidos pela sua implantação. O método Payback é entendido como o tempo necessário para que se tenha retorno sobre o investimento em um projeto, ou seja, representa o tempo necessário para que o custo de instalação se pague e, a partir de então, comece a gerar lucro, porém a que considerar que no cálculo do Payback a taxa de desconto não é considerada.

Dessa forma, a definição de Payback descontado preenche essa lacuna ao incidir sobre os cálculos o valor do dinheiro no tempo, fazendo uso da taxa de desconto, para verificar, com exatidão, o tempo em que o fluxo de caixa alcança o valor inicial investido. Na sua avaliação estão envolvidos, como variáveis de cálculo, a contabilização do custo do kWh sem impostos, vendida para a concessionária de energia, com os custos do kWh, com impostos que será comprado da concessionária, a geração média mensal do sistema, o valor do investimento e o perfil da unidade consumidora, todas essas variáveis estão estruturadas na Equação 7.

$$\text{Payback}_{\text{Ano}} = \frac{\text{Investimentos}}{\text{Energia Gerada} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{Ano}} \right) \cdot \text{Valor da Tarifa}} \quad (7)$$

O Valor Presente Líquido está associado às decisões de investimento, o método é um dos critérios mais difundidos para a seleção das oportunidades de investimento, ele mensura o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto. Definido sobre a soma dos fluxos de caixa futuros, por uma taxa de desconto apropriada, como mostra a Equação 8.

$$\text{VPL} = \sum_{t=1}^n \frac{\text{FC}_t}{(1+i)^t} - \text{FC}_0 \quad (8)$$

Em conformidade com a Equação 8 o VPL é o fluxo de caixa do investimento,  $\text{FC}_t$  corresponde a entrada de fluxo de caixa de cada período,  $i$  é a Taxa Mínima de Atratividade esperada pelo investimento e  $n$  é o período estimado para o projeto.

Define-se a Taxa Interna de Retorno como a taxa de juros que torna o valor do VLP do projeto igual a zero. Com o resultado do processo de cálculo tem-se que para valores maiores ou igual a Taxa de Desconto do projeto é considerado rentável, representado pela Equação 9.

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} - FC_0 = 0 \quad (9)$$

Define-se  $FC_0$  como o investimento realizado no momento zero,  $FC_t$  é a entrada ou fluxo de caixa de cada período,  $k$  é a Taxa de Retorno e  $n$  é o período estimado para o projeto.

Os métodos apresentados são condicionados pela determinação da Taxa de Desconto que estabelece uma relação entre tempo e capital. O seu valor numérico é atribuído ao custo de capital dos investidores, no entanto para a consolidação de análises de viabilidades de projetos do setor elétrico a Empresa de Pesquisa Energética assume o valor de 8%.

### 2.11 Viabilidade ambiental

Na abordagem ambiental, o uso de energia, sem a consideração de eficiência energética, contribui para a emissão de gases de efeito estufa desnecessários, com impactos que provocam alterações climáticas em escala global. Inerente à temática de eficiência energética, inclui-se as perdas de água, uma vez que toda energia utilizada na produção e transporte desse recurso também é perdida.

No que tange aos índices de perda de água, nenhum estado da federação consegue situar-se nas primeiras e segundas faixas, com índice de perda na distribuição menor que 20% e entre 20% e 30%. A região Norte e o estado do Tocantins apresentam, respectivamente, 47,3% e 30,1% de perdas, esses índices afetam a eficiência energética dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário implantados (Brasil, 2016).

A avaliação ambiental considera os valores gastos na utilização, pelas concessionárias, de motogeradores, alimentados por óleo diesel, em suprir demandas das estações Elevatórias e Booster, sendo alocados também em estações de tratamento em períodos de tarifa alta, sendo relevantes os custos na sua aquisição e manutenção.

A abordagem de viabilidade ambiental é então determinada pela análise de emissões de poluentes na atmosfera, quantificando as reduções alcançadas pela utilização do sistema fotovoltaico e, também, a partir dos valores gastos com motogeradores.

Salienta-se, também, a representatividade do consumo energético sobre o índice de perdas de água. A relevância desses fatores é aferida, em razão de reterem recursos financeiros que poderiam ser empregados na expansão dos sistemas.

A avaliação foi elaborada em função do contraste com os sistemas de produção de energias Geotérmicas e termoelétricas, que ao optar pela produção por energia solar, há que considerar a redução de emissões de poluentes para a atmosfera. O volume desse decréscimo de poluentes é definido pela quantidade de emissões de poluentes por kWh por ano produzido pelos sistemas contrastados.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Análise econômica

Camargo (2017) aponta que o valor de investimento considerado deve ser o valor global do projeto, sendo necessário identificar todos os custos. Incube destacar a inclusão do custo de mão de obra que é estimado em 10% do preço total do projeto. Há ainda o aprisionamento de recursos, devido os custos com operação e manutenção (O&M), Zilles (2012) citado por Araújo et al. (2018) que contabilizaram 1% do valor inicial do SFCR para os custos com O&M.

Os indicadores econômicos alcançados com o SFCR são calculados considerando o índice de despesas com energia elétrica em sistema de água e esgoto, publicado pelo SNIS, que registra o valor em 0,49 R\$/kWh, ponderado pelo reajuste de energia elétrica, que, conforme Pierry (2017) citado por Camargo (2017), o Ministério de Minas e Energia estima seu índice, no pior cenário, em 7%.

Também são apreciados na análise, os custos de demanda de energia elétrica contratada. Sendo, pois, as estações de tratamento enquadradas na modalidade tarifária horária azul. Atribuindo, assim, o subgrupo A2 para ETA e A3A para ETE, ambas admitidas na classe de serviços públicos. Esse valor será considerado como demanda fora de ponta, devido à energia elétrica produzida pelo SFCR suprir apenas 25% do seu consumo total e, em observância ao que determina o Caderno Temático de

Microgeração e Minigeração Distribuída, publicado pela Aneel, que nessa situação, tarifa horária, a energia injetada deve ser utilizada, prioritariamente, para abater o consumo no mesmo período.

Ao vigésimo quinto ano, de funcionamento do SFCR, são previstos a troca do inversor, decorrente do seu ciclo de vida ser estimado pelo fabricante em 15 anos.

Devido às estações de tratamento apresentarem dimensionamento dos sistemas com a mesma potência, é suficiente a demonstração dos resultados da análise de viabilidade da ETA 003 e ETE Compacta 001, pois a sua análise reflete valores equivalentes das outras estações.

A partir dos dados supracitados é possível analisar o rendimento do sistema ao longo dos 25 anos de durabilidade, que são mostrados na Tabela 14.

**Tabela 14** - Desempenho dos sistemas fotovoltaicos

Comparativo de resultados	Economia no 1º ano (R\$)	Investimento (R\$)	Valor presente Líquido (R\$)	TIR (%)	Payback descontado (Anos)
ETA	R\$ 179.866,54	R\$ 1.214.278,56	R\$ 1.316.735,58	20	7,17
ETE	R\$ 14.425,21	R\$ 165.806,65	R\$ 114.638,76	14	8,42

Fonte: Autor, 2019.

A plotagem dos dados, dispostos na análise, encontrou diferentes valores para os indicadores econômicos. As suas TIR sobrepõem à taxa de desconto de 8%, alcançando 21% de rentabilidade para ETA e 14% para ETE, tornado os projetos viáveis, implicando na injeção de capital ao investidor, pelo VLP positivo. Atrelado a um investimento de baixo risco, decorrente da geração do sistema ser afetada somente por condições climáticas.

Os resultados alcançados são uma extensão daqueles descritos por Alves & Lira (2018), cuja análise de viabilidade técnica e econômica da implantação de sistema solar fotovoltaico no aeroporto de Teresina – PI, permitiu concluir que é possível alcançar a potencialização dos resultados com o cálculo de TIR, VPL e Payback, a partir da simulação de dois cenários limites, com a projeção das economias anuais alcançadas.

Mediante o comparativo das previsões de faturamento mensais, considerando as contribuições da geração distribuída, contabilizou-se a cada cenário os efeitos da carga tributária.

Com as simulações, o primeiro cenário alcançou um percentual de redução anual de 67,87% dos valores pagos em energia. O decréscimo no consumo é evidenciado ao se contrapor o somatório anual da fatura de energia sem a geração distribuída considerada, que era de R\$ 67.228,53 antes da instalação do SFCR, com a geração distribuída esse valor decresce para R\$ 21.599,55.

No entanto esse representa o pior cenário, em que os impostos a serem pagos incorrem sobre todo o consumo realizado, desconsiderando os quantitativos de energia elétrica injetados na rede com a geração distribuída, ocorrida em momento distinto do consumo.

Os índices alcançados no segundo cenário representam a melhor situação para o consumidor, da qual todo o quantitativo produzido é deduzido do consumo, por serem realizados no mesmo momento, e os impostos são deduzidos sobre a diferença de consumo e geração ou acima do custo de disponibilidade do sistema elétrico, quando a geração é maior que o consumo. A análise de tal cenário aplica-se, ainda, sobre a possibilidade de desoneração do ICMS ao volume de energia elétrica gerado ou ao acumulado pelo excedente da própria unidade consumidora nos meses anteriores ao faturamento.

A cotação financeira para a implantação do projeto aconteceu através de consultas a empresas especializadas em Teresina – PI. Com o conhecimento dos custos de investimentos e dos montantes deduzidos em cada cenário, a estrutura de cálculo resultou nos valores de tempo de retorno, taxa de retorno e previsão e ganho com o investimento, evidenciados na Tabela 15.

**Tabela 15** - Análise de investimento

Comparativo de resultados	Economia anual (R\$)	Investimento (R\$)	Valor Presente Líquido (R\$)	TIR (%)	Payback descontado (Anos)
Cenário 1º	R\$ 45.628,98	R\$ 449.691,26	R\$ 938.985,32	10,76	8,10
Cenário 2º	R\$ 64.758,70	R\$ 449.691,26	R\$ 1.521.180,99	15,88	5,70

Fonte: Autor, 2019.

O abatimento de impostos referenciados por Alves & Lira (2018), são instituídos no estado do Tocantins com a publicação da Lei nº 3.179/2017 e Decretos nº 2.912/2006 e nº 6.469/2022. A partir de então, o governo vem fomentando o aproveitamento do potencial energético e diversificando as fontes de energia elétrica entre os moradores, incentivando, assim, o desenvolvimento tecnológico e a geração de energia solar e térmica. Soma-se, ainda, a isenção do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e, os incentivos concedidos pela Prefeitura de Palmas, advindos do Programa Palmas Solar, sendo o desconto de até 80% do IPTU (por até 05 anos), Imposto sobre a Transmissão de Bens Imóveis (ITBI) e Imposto sobre Serviços de Qualquer Natureza (ISSQN), para empresas que instalem módulos fotovoltaicos.

Essa realidade tem propiciado a expansão dos sistemas no estado, com adesão de empresas de diversos seguimentos, tendo-se como exemplo o Restaurante Dom Vergílio de Palmas-TO, que instalou 578 painéis fotovoltaicos, totalizando 190.74 kWp de energia solar. Esse sistema tem gerado 285.700 kWh por ano de energia elétrica, com economia média anual de R\$ 242.000,00. Já a Universidade Federal do Tocantins – UFT viabilizou a instalação de 1.800 módulos fotovoltaicos, com um sistema gerador de 600 kWp de capacidade com valor de investimento orçado em R\$ 2.517.030,00. A iniciativa possibilitará uma redução entre 10% e 15%, representado uma economia entre R\$ 800 mil a R\$ 1,2 milhão ao ano.

### 3.2 Valoração ambiental

As Tabelas 16-17 apresentam os poluentes e suas respectivas concentrações, emitidas por sistemas Geotérmicos e termoeletricos e o equivalente de redução alcançado com o SFCR.

**Tabela 16** - Estimativa do equivalente de emissões de poluentes por termoeletricas

EQUIVALENTE DE EMISSÕES TERMOELÉTRICA EM SISTEMA SOLAR			
Gases de Efeito Estufa	Emissão em Termoeletrica	Redução em ETA	Redução em ETE
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	7,00823 · 10 <sup>-4</sup> kg/kWh	258,26 kg/ano	26,95 kg/ano
Óxidos de Nitrogênio (NO <sub>x</sub> )	8,82378 · 10 <sup>-4</sup> kg/kWh	325,17 kg/ano	33,93 kg/ano
Poeiras	3,1339 · 10 <sup>-5</sup> kg/kWh	11,5 kg/ano	1,2 kg/ano
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5,2143 · 10 <sup>-1</sup> kg/kWh	192.156,13 kg/ano	20.049,35 kg/ano

Fonte: Santos & Blanco (2016).

**Tabela 17** - Estimativa do equivalente de emissões de poluentes por fonte Geotérmica

EQUIVALENTE DE EMISÕES GEOTÉRMICA EM SISTEMA SOLAR			
Gases de Efeito Estufa	Emissão em Geotérmica	Redução em ETA	Redução em ETE
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	3,0799 · 10 <sup>-5</sup> kg/kWh	11,35 kg/ano	1,18 kg/ano
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	5,9438 · 10 <sup>-3</sup> kg/kWh	2.190,39 kg/ano	228,54 kg/ano
Tonelada equivalente de Petróleo (TEP)	2,3 · 10 <sup>-1</sup> kg/kWh	84.759,05 kg/ano	8.843,67 kg/ano

Fonte: Canadian Energy Research Institute (2016) e Royal Academy of Engineering.

Há também que incluir a valoração das parcelas de custo, atribuída à prevenção e mitigação de externalidades ambientais negativas, principalmente em projetos hidrelétricos que supera 10% do investimento total. Segundo Nota Técnica 27/13 da Empresa de Pesquisa energética, as emissões de CO<sub>2</sub> em projetos térmicos não são precificadas e orçadas nas previsões de medidas de prevenção e mitigação ambiental. Neste aspecto algumas instituições internacionais, como o Canadian Energy Research Institute (CERI) e a Royal Academy of Engineering, incluem nos seus estudos de viabilidade um custo adicional concernente as emissões de CO<sub>2</sub>, valores entre 7,00 e 14,00 US\$ por tonelada. A previsão de impacto econômico das externalidades ambientais negativas associadas às emissões das diferentes fontes de energia elétrica na Europa é apresentada na Tabela 18.

Nas considerações dos efeitos de emissões de Gases Efeito Estufa, Santos & Blanco (2016) em seu estudo de viabilidade para a implantação de sistemas de produção de energia renovável para comunidades isoladas da Amazônia, estimou valores em 37,81 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano de redução nas emissões, o que corresponde a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente a operação de um sistema de geração de energia movido a combustíveis fósseis, por exemplo, óleo diesel.

As emissões de seu projeto são consideradas zero, pois considerou-se que o sistema de geração de energia elétrica utilizará como fonte de energia, a solar fotovoltaica, biomassa ou hidrocínica. A estimativa de crédito de carbono é de 378,1 toneladas de CO<sub>2</sub> ao considerar um projeto de MDL com duração de 10 anos.

**Tabela 18** - Valores econômicos de emissões (Euro-cents/kWh)

IMPACTO	TECNOLOGIA DE GERAÇÃO						
	Carvão	Linhito	Gás (CC)	Nuclear	PV	Eólica	Hidro
Saúde	0,80	1,00	0,30	0,20	0,40	0,05	0,04
Colheitas	-0,03	-0,03	-0,01	0,0008	-0,003	0,0005	0,0004
Danos materiais	0,02	0,02	0,007	0,002	0,01	0,001	0,0007
Poluição sonora	-	-	-	-	-	0,006	-
Acidificação	0,20	0,80	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00
Aquecimento global	1,60	2,00	0,80	0,03	0,30	0,03	0,03
Total	2,59	3,79	1,14	0,23	0,75	0,09	0,07

Fonte: Santos & Blanco, 2016.

Essa estimativa permite vislumbrar um valor de US R\$ 4.964,45, correspondente a R\$ 20.056,38, pelas toneladas de CO<sub>2</sub> obtidas pelo projeto, de acordo com o piso das permissões de emissões da Califórnia que em fevereiro de 2016 era de US\$ 13,13/t CO<sub>2</sub>, segundo a CalifórniaCarbon (2022). Logo, mesmo com a discriminação de custos do processo, obter-se-ia um valor considerável para as despesas com operação e manutenção do sistema.

#### 4 DISCUSSÕES

Ao analisar os resultados, nota-se que o VLP aumentou de acordo com a potência instalada do SFCR e consequentemente o custo unitário por kWh gerado diminuiu. Essa mesma situação fora definida por Alves & Lira (2018) que atribuiu a geração distribuída cenários favoráveis de viabilidade econômica, devido ao médio prazo de retorno do investimento e pelo alcance de 83,32% a 98,85% de redução no faturamento mensal de consumo de energia. O escopo do estudo de Alves & Lira (2018) limitou-se a avaliação da viabilidade técnica e econômica, no entanto a solução alcançou excelente viabilidade ambiental, excelência esta atribuída a baixa representatividade de impactos ambientais. Representando, assim, uma promissora oportunidade de ganho real do investimento, com redução de custos no consumo de energia elétrica.

Camargo (2017), também aponta que é possível obter uma boa rentabilidade com o SFCR, mostrando ser um investimento sustentável e de baixo risco. Suas proposições se equiparam ao primeiro cenário simulado por Santos & Blanco (2016), visto que na região de desenvolvimento do estudo não ocorreram a compensação de ICMS e PIS/Cofins, sendo toda a energia produzida vendida para a concessionária, livre de impostos e creditada na conta da unidade consumidora com cobrança de impostos.

Já a viabilidade ambiental é defendida com maiores detalhes por Santos & Blanco (2016), que consideraram que a concepção de sistemas de produção de energia solar fotovoltaica ambientalmente sustentável, adequa-se as necessidades das unidades consumidoras, conferindo autonomia para desenvolver projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), tendo em vista que o sistema reduz a emissão de Gases do Efeito Estufa e promove a geração de renda através da comercialização de créditos de carbono. A integração da venda dos créditos de carbono na análise de viabilidade atenua a expressividade do tempo de Payback e eleva a rentabilidade do sistema.

Ainda sobre a viabilidade ambiental pertinente a cada estação, ETA e ETE, é reconhecida a disparidade na disponibilidade de área útil, em face aos processos de tratamentos adotados, exigindo-se que o projetista faça a análise isolada dos fatores intervenientes locais de cada estação para à prospecção da viabilidade do SFCR. A análise deve ser feita considerando algumas das características de composição do sistema de tratamento de água ou esgoto que potencializam perdas e ganhos no rendimento do SFCR.

Fatores como a proximidades de cursos hídricos e adensamentos florestais, constituídos principalmente por Áreas de Preservação Permanente, influenciam as perdas por sombreamento, mas, em contrapartida a sua proximidade a recursos hídricos, favorece menores valores e variações de temperatura, reduzindo, então, as perdas por aquecimento dos módulos.

Há que considerar, também, que enquanto a ETA não enfrenta resistência pela população, quanto a sua alocação, a área de instalação de ETE é restringida pela resistência da população, que é motivada pelo risco de proliferação de vetores e odores, com maiores riscos de contaminação e produtividade de lodo. No entanto, tendo em vistas essas características das ETE's, a necessidade de área para adensamento de lodo e lagoas, estão associadas à necessidade de maiores disponibilidade de área, a menores custos de aquisição, por estarem mais afastadas de aglomerados urbanos, sendo que essas vantagens favorecem a instalação do SFCR.

Assim, as análises de implantação dos SFRC inspiram novos estudos que visem estimar a viabilidade da comercialização de crédito de carbono e os impactos ambientais atrelados aos sistemas de geração de energia de fontes renováveis, a reunião dessas e outras oportunidades de mercado torna a implantação dos sistemas de produção de energia de fontes renováveis sustentável economicamente e ambientalmente (Santos & Blanco, 2016).

Diante desse cenário, racionalizar o uso de energia é uma demanda imediata, não apenas no Brasil, mas no mundo. A busca por uma geração distribuída e de consumos mais eficientes impulsionam a entrada de novas tecnologias e soluções no mercado. Destaca-se que a sua atratividade é definida pelos incentivos públicos e as facilidades apreciadas que atenuam ainda mais os índices de Payback e rentabilidade. Salientasse ainda a existência de fontes de investimentos em projetos de aproveitamento energético fomentados por concessionárias de energia elétrica. Aliado ao ganho ambiental que se concentra na oportunidade de expansão dos sistemas de saneamento pelas economias alcançadas e o investimento em preservação de afluentes, e ainda a redução na emissão de gases de efeito estufa.

Os resultados alcançados mostram que o sistema é capaz de atender a demanda dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário, além de reduzir os desperdícios de energia, que segundo a Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO), o quantitativo de energia perdida equivale à produção de meia Itaipu todos os anos.

## 5 CONCLUSÕES

Os ensaios encontraram resultados distintos de payback, TIR e VPL para as estações de tratamento, para ambas os indicadores tornam viáveis os investimentos em SFRC. Os resultados indicam maior factibilidade a implantação de SFRC em ETA, por apresentar menores tempos de retorno e maiores rendimentos, oferecendo maior atratividade, devido ao valor agregado previsto pelo VLP.

Na avaliação ambiental, dada pela redução de emissões de poluentes e pela possibilidade de comercialização de créditos de carbono, a esses parâmetros, a ETA apresentou maiores índices de redução. No entanto, o fato de o índice de redução ser proporcional à energia elétrica produzida, supõe-se que a viabilidade ambiental do SFRC se restringe a emissão de gás carbônico, sendo que a redução de emissão alcançada pelo sistema é insuficiente para a comercialização de carbono, devido a pouca relevância das emissões de poluentes em SFRC menores. Nessa perspectiva um incremento da potência do SFRC de ETE viabilizaria maiores vantagens ambientais ao projeto.

Outro fator avaliado é o potencial de otimização da função ambiental de terrenos com a instalação do SFRC. Entre as estações de tratamento de água e esgoto a sua otimização é função da disponibilização de áreas, quanto a isso as estações de tratamento de esgoto possuem maior facilidade de comportar o SFRC, tendo em vista que sua alocação é prioritariamente afastada de aglomerados urbanos, devido à resistência da população em residir nas proximidades, pelo risco oferecidos de contaminação e proliferação de vetores e odores.

Atrelada a essa característica, há o indicativo de maiores disponibilidade de área, com menores valores de mercado para a implantação do SFRC, também, corrobora para a maior disponibilidade de área em ETE, a necessidade de áreas mais extensas, pré-concebidas para o adensamento de lodo, e para a implantação de lagoas de tratamento. Difere também da ETE sobre a ETA o aporte inicial investido, sendo mais expressivo em estações de tratamento de água devido ao maior gasto com energia elétrica, exigindo SFRC maiores.

Diante do indicativo de possíveis cenários favoráveis de elevação de gastos com energia elétrica, o estudo reforça o entendimento da necessária intervenção de medidas de eficiência energética de modo a reduzir os consumos de energia no setor de saneamento, esse entendimento torna a implantação dos sistemas de produção de energia solar fotovoltaicas uma alternativa viável, ao oferecer vantagens em âmbito econômico e ambiental, garantindo a redução no montante de recursos exauridos em gastos com energia.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. (2014). *Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica*. Brasília: ANEEL. Recuperado em 09 de novembro de 2019, de <https://www2.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>
- Alves, D. R. S., & Lira, M. A. T. (2018). Estudo de viabilidade técnica e econômica para implantação de energia solar fotovoltaica em unidade consumidora no aeroporto de Teresina no estado do Piauí. In *VII Congresso*

- Brasileiro de Energia Solar*. Gramado: Associação Brasileira de Energia Solar. Recuperado em 09 de novembro de 2018, de <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/viewFile/567/567>
- Andrade Sobrinho, R., & Borja, P. C. (2016). Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 21(4), 783-795. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016116037>.
- Araújo, B. L., Sousa, R. W. S., Henrique, E., Dullius, D. J., Monteiro Júnior, A., & Menezes, A. V. (2018). Estudo de financiamento de sistema fotovoltaico conectado à rede no norte do Brasil para pessoa jurídica. In *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado: Associação Brasileira de Energia Solar. Recuperado em 19 de abril de 2019, de <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/507/507>
- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR. (2022, 17 de novembro). *Financiamentos*. Recuperado em 14 de abril de 2019, de <http://www.absolar.org.br/financiamento>
- Balfour, J., Shaw, M., & Nash, N. B. (2016). *Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos*. Rio de Janeiro: Grupo Editorial Nacional.
- Brasil. (2000, 25 de julho). Lei nº. 9.991, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e da outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília. Recuperado em 30 de novembro de 2022, de <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2000/lei-9991-24-julho-2000-359823-norma-actualizada-pl.html>
- Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. (2016). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2016*. Recuperado em 09 de setembro de 2018, de <http://www.snis.gov.br>
- CalifórniaCarbon (2022). *Piso das permissões de emissões da Califórnia*. Recuperado em 30 de novembro de 2022, de <http://californiacarbon.info>
- Camargo, L. T. (2017). *Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica* (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Estadual de Londrina, Londrina. Recuperado em 09 de setembro de 2018, de [http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017\\_LucasTamaniniCamargo.pdf&ved=2ahUKewjQ7KCsvq\\_eAhVEi5AKHeNVD7YQFjADegQIAhAB&usq=A0vVaw1lieHcZJLsGWieTV9oM](http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2017_LucasTamaniniCamargo.pdf&ved=2ahUKewjQ7KCsvq_eAhVEi5AKHeNVD7YQFjADegQIAhAB&usq=A0vVaw1lieHcZJLsGWieTV9oM)
- Canadian Energy Research Institute – CERI. (2016). Recuperado em 30 de novembro de 2022, de <https://canadacommons.ca>
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – CRESESB. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. (2018, 25 de janeiro). *Potencial Solar. SunData v. 3.0*. Recuperado em 09 de novembro de 2018, de <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>
- Chernicharo, C. A. L., Ribeiro, T. B., Garcia, B. G., Lermontov, A., Platzter, J. C., Possetti, G. R. C., & Rosseto, M. A. L. R. (2018). Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. *Revista DAE*, 66(213), 5-19. Recuperado em 09 de novembro de 2019, de [http://revistadae.com.br/artigos/artigo\\_edicao\\_213\\_n\\_1748.pdf](http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_213_n_1748.pdf)
- Energisa (2019). *Impostos e outros encargos*. Recuperado em 09 de setembro de 2018, de <http://www.energisa.com.br>
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO. (2018, 19 de junho). *Registro de objeto. Canadian Solar Brasil Comercialização, Importação e Exportação de Painéis Solares LTDA*. Recuperado em 09 de novembro de 2018, de <http://registro.inmetro.gov.br/consulta/detalhe.aspx?pag=1&NumeroRegistro=003210/2018>
- Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (2018). *O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica* (5 ed.). Recuperado em 14 de abril de 2019, de [https://issuu.com/idealeco\\_logicas/docs/estudofv2018\\_digital3/71](https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudofv2018_digital3/71)
- Macedo, W. N. (2006). *Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR)* (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo. Recuperado em 18 de abril de 2019, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-29112006-153307/pt-br.php>
- Menezes, A. V., & Daniel, J. (2016). Análise de operação do primeiro ano de um sistema fotovoltaico conectado à rede de 21,75 kWp na cidade de Palmas – TO segundo a resolução 482/2012 da ANEEL. In *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Energia Solar. Recuperado em 19 de abril de 2019, de [https://www.academia.edu/30521321/AN%C3%81LISE\\_DE\\_OPERA%C3%87%C3%83O\\_DO\\_PRIMEIRO\\_ANO\\_DE\\_UM\\_SISTEMA\\_FOTOVOLTAICO\\_CONECTADO\\_%C3%80\\_REDE\\_DE\\_21\\_75\\_kWp\\_NA\\_CIDADE\\_DE\\_PALMAS-TO\\_SEGUNDO\\_A\\_RESOLU%C3%87%C3%83O\\_482\\_2012\\_DA\\_ANEEL](https://www.academia.edu/30521321/AN%C3%81LISE_DE_OPERA%C3%87%C3%83O_DO_PRIMEIRO_ANO_DE_UM_SISTEMA_FOTOVOLTAICO_CONECTADO_%C3%80_REDE_DE_21_75_kWp_NA_CIDADE_DE_PALMAS-TO_SEGUNDO_A_RESOLU%C3%87%C3%83O_482_2012_DA_ANEEL)
- Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Básico. (2014). *Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)*. Brasília: Ministério das Cidades. Recuperado em 09 de novembro de 2018, de

[https://bibliotecadigital.economia.gov.br/bitstream/123456789/961/1/Plano\\_Nacional\\_Saneamento\\_Basico\\_PLANSAB\\_MCidades.pdf](https://bibliotecadigital.economia.gov.br/bitstream/123456789/961/1/Plano_Nacional_Saneamento_Basico_PLANSAB_MCidades.pdf)

- Mitidieri, M. F. (2017). *Análise do potencial de geração distribuída de energia solar fotovoltaica nos setores bancário, de educação básica e postos de gasolina* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Recuperado em 10 de novembro de 2018, de <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/es/publicacoes/dissertacoes/2017/254-analise-do-potencial-de-geracao-distribuida-de-energia-solar-fotovoltaica-nos-setores-bancario-de-educacao-basica-e-postos-de-gasolina>
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., & Rütther, R. (2006). *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: INPE. Recuperado em 05 de abril de 2018, de [http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf)
- Prefeitura de Palmas (2019). *Plano diretor de água e esgoto*. Recuperado em 09 de setembro de 2018, de <http://www.palmas.to.gov.br>
- Rütther, R. (2004). *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. Florianópolis: LABSOLAR.
- Santos, V. S., & Blanco, C. J. C. (2016). Estimativa de crédito de carbono na geração de energia com fontes renováveis na ilha de Marimarituba em Santarém – PA. *Revista de Estudos Ambientais*, 18(1), 17-29. Recuperado em 09 de novembro de 2018, de <http://gorila.furb.br/ojs/index.php/rea/article/viewFile/5330/3457>
- Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2012). *Energia solar fotovoltaica: conceito e aplicações*. São Paulo: Érica.

#### **Contribuições dos autores:**

Jefferson Martins Oliveira: planejou, estruturou, elaborou e executou a proposta. Redigiu o artigo.

Juan Carlos Valdés Serra: planejou, estruturou e elaborou a proposta. Revisou o artigo.

Joel Carlos Zukowski Junior: orientou o tema de avaliação econômica: Payback. Revisou o artigo.

Alex Vilarindo Menezes: orientou o tema de Sistema de Energia solar Fotovoltaicos Conectados a Rede. Revisou o artigo.