

# **Precificação da emissão de gases de efeito estufa da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso na Universidade de Brasília**

**Guilherme Macedo das Neves** (UnB) - guilherme.macedo.amb@gmail.com

**Rafael Amaral Shayani** (UnB) - shayani@ene.unb.br

## **Resumo:**

*Tendo em vista o plano para crescimento da matriz de energia elétrica brasileira e os problemas ambientais da geração de elétrica, pesquisa-se sobre os benefícios ambientais da energia solar fotovoltaica em relação à termelétrica a gás, a fim de analisar e quantificar esses benefícios para 100% da energia elétrica consumida no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Para tanto, é necessário mensurar as emissões de gases poluentes da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás para suprir totalmente o consumo de energia elétrica do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, quantificar os custos das externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás, comparar os custos dos sistemas energéticos sem as externalidades ambientais, e relacionar os custos dos aspectos ambientais na comparação de custos econômicos dos sistemas energéticos. O custo de instalação de uma usina fotovoltaica no campus estudado é de 50 milhões de reais, em média. Realiza-se, então, uma pesquisa dos impactos dos gases do efeito estufa e poluentes do ar para a geração de energia a partir das duas fontes estudadas e dos custos dos sistemas. Diante disso, verifica-se que a energia termelétrica com ciclo combinado gera 10 vezes mais poluição de gases do efeito estufa do que a energia fotovoltaica para o estudo de caso, os gases do efeito estufa são mais emitidos do que os poluentes do ar, e 23% do custo total com externalidades para termelétrica a gás de ciclo combinado com média taxa de desconto e taxa específica média são referentes ao custo das externalidades ambientais, o que impõe a constatação de que a energia fotovoltaica é mais benéfica ambientalmente do que a energia termelétrica a gás.*

**Palavras-chave:** *Energia fotovoltaica, Externalidades ambientais, Termelétrica a gás*

**Área temática:** *Mercado, economia, política e aspectos sociais*

**Subárea temática:** *Impactos sociais, econômicos e ambientais de energias renováveis*

# PRECIFICAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DA ENERGIA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL: ESTUDO DE CASO NA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**Guilherme Macedo das Neves** – guilherme.macedo.amb@gmail.com  
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental  
**Rafael Amaral Shayani** – shayani@ene.unb.br  
Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** Tendo em vista o plano para diversificação da matriz de energia elétrica brasileira e os problemas ambientais da geração de elétrica, pesquisa-se sobre os benefícios ambientais da energia solar fotovoltaica em relação à termelétrica a gás, a fim de analisar e quantificar esses benefícios para 100% da energia elétrica consumida no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Para tanto, é necessário mensurar as emissões de gases poluentes da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás para suprir totalmente o consumo de energia elétrica do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, quantificar os custos das externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás, comparar os custos dos sistemas energéticos sem as externalidades ambientais, e relacionar os custos dos aspectos ambientais na comparação de custos econômicos dos sistemas energéticos. O custo de instalação de uma usina fotovoltaica no campus estudado é de 50 milhões de reais, em média. Realiza-se, então, uma pesquisa dos impactos dos gases poluentes para a geração de energia a partir das duas fontes estudadas e dos custos dos sistemas. Diante disso, verifica-se que a energia termelétrica com ciclo combinado gera 10 vezes mais poluição de gases do efeito estufa do que a energia fotovoltaica para o estudo de caso, os gases do efeito estufa são mais emitidos do que os poluentes do ar, e 23% do custo total com externalidades para termelétrica a gás de ciclo combinado com média taxa de desconto e taxa específica média são referentes ao custo das externalidades ambientais, o que impõe a constatação de que a energia fotovoltaica é mais benéfica ambientalmente do que a energia termelétrica a gás.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica, Externalidades ambientais, Termelétrica a gás.

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, a população tem aumentado consideravelmente e com ritmo cada vez mais acelerado. Isso faz com que setores de abastecimento da sociedade, como o setor elétrico, cresçam também, permitindo o desenvolvimento constante. A sociedade sempre se baseou na utilização de combustíveis fósseis para os diversos objetivos energéticos, isso mostra-se como um problema para o meio ambiente e para as futuras gerações pois eles são poluentes e não são renováveis, provocando assim vários problemas ambientais, principalmente devido à poluição atmosférica, que causa o efeito estufa, mudanças climáticas e problemas respiratórios.

O sistema climático já é claramente influenciado pelos seres humanos, recebendo atualmente as emissões antrópicas de gases de efeito estufa mais altas da história. As recentes mudanças climáticas têm causado impactos generalizados nos seres humanos e meio ambiente (IPCC, 2014a).

As discussões sobre as questões ambientais se iniciaram nas últimas décadas por todo mundo e vêm aumentando cada vez mais, como é visto nas muitas conferências e encontros realizados por vários países. Diante dessa preocupação, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para fornecer aos legisladores avaliações regulares da base científica das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros e opções de adaptação e mitigação (IPCC, 2018). Em sequência, o IPCC foi determinante para que houvesse a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), o principal tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das alterações climáticas.

A emissão de GEE poderá causar negativos uma série de eventos já está sendo prevista, como ondas de calor com maior frequência, precipitações com maiores intensidades, aumento na temperatura dos oceanos, entre outros (IPCC, 2014a). De todas as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, o setor energético é responsável por aproximadamente 63% das emissões mundiais e tem aumentado sua emissão de CO<sub>2</sub> nos últimos anos para valores cada vez mais altos. Desse modo, é de extrema importância que se transforme o setor energético para que se combata o problema da mudança climática (IEA, 2015).

Importante lembrar que alguns Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas são grandes motivações para este trabalho. Os objetivos 3, 7, 11 e 13, respectivamente, se relacionam com questões de poluição, energia e sustentabilidade: promover uma vida saudável para as pessoas; promover a sustentabilidade na energia; transformar as cidades em cidades sustentáveis; e estabelecer medidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos (ONU, 2019).

Diante desse contexto, onde há grande preocupação com a poluição e geração de energia, o presente trabalho busca propor uma forma de comparação de custos entre duas fontes de energia distintas, a energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás, considerando questões ambientais.

Um estudo de caso é aplicado à Universidade de Brasília, que possui grande espaço territorial e edifícios que são predominantemente horizontais, com consumo de energia de aproximadamente 2.000.000 kWh/mês (Bertasso, 2016).

O presente estudo encontra-se dentro do âmbito do Programa de P&D ANEEL, Chamada ANEEL N° 001/2016 "Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", e do Termo de Cooperação Técnica 502/2018, celebrado entre CEB Distribuição S.A. e Fundação Universidade de Brasília, intitulado "Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB".

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Energia fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica se origina a partir da conversão direta da luz em energia elétrica, que possui como essência o efeito fotovoltaico. O surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de material semicondutor causado pela absorção de luz é o resumo do efeito fotovoltaico, descrito por Edmond Becquerel em 1839 (EPE, 2016a).

Os aspectos positivos da utilização da energia fotovoltaica são muitos, principalmente quando comparados com energias não renováveis. Os poluentes como gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , entre outros), materiais particulados, óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e monóxido de carbono (CO) não são emitidos enquanto ocorre a geração de energia pelos painéis fotovoltaicos, beneficiando o meio ambiente localmente e globalmente (EPE, 2016a).

O Brasil é um país muito favorável para que se desenvolva energia solar fotovoltaica. O Brasil está localizado em sua maior parte na região entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio, onde ocorre a incidência bastante vertical dos raios solares. Em Brasília, cada metro quadrado de módulos fotovoltaicos instalados é capaz de produzir 696 Wh/dia, se for considerado um sistema solar fotovoltaico com rendimento total em 12% e a irradiação solar diária de 5,8 kWh/m<sup>2</sup> dia (WWF, 2016).

### **2.2 Energia termelétrica a gás natural**

O processo de uso do gás natural para geração de energia elétrica é relativamente simples. Nas usinas termelétricas, a conversão em eletricidade ocorre depois que se tem energia mecânica, que é concebida após a queima do gás, entrando em um ciclo térmico que resulta em potência mecânica e aciona o eixo de um gerador elétrico (EPE, 2016b).

Emissão de poluentes atmosféricos é um ponto de bastante preocupação relacionados à geração de energia termelétrica. A emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), deterioram a qualidade do ar, causam efeitos negativos na saúde da população local e acidificação da água das chuvas, é bastante preocupante. Já a emissão de material particulado (MP) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) é bem menor (EPE, 2016b).

Atualmente, existe uma grande preocupação com fontes de emissão de gases de efeito estufa, visto que já se existem muitos estudos sobre os problemas da poluição. A emissão de gases de efeito estufa, principalmente o  $\text{CO}_2$ , é também ocorrida na queima do gás natural, o que colabora com o crescimento no nível desses gases e a alteração no clima global (EPE, 2016b).

A utilização do gás natural pode ocorrer com diferentes tecnologias, os dois modos estudados neste trabalho são os mais comuns no mercado. A termelétrica com turbina a gás de ciclo simples é constituída de uma única turbina a gás para geração de energia e a termelétrica de ciclo combinado é semelhante à de ciclo simples, porém se acrescenta uma turbina a vapor que aproveita o calor da turbina a gás para geração de energia, aumentando sua eficiência.

### **2.3 Cenário energético**

O crescimento na utilização de todas as fontes na geração de energia elétrica é evidente, porém se observa que a energia proveniente das águas se manteve muito parecida no decorrer do tempo. A geração por queima de combustíveis fósseis, que já era alta, dobrou de tamanho entre 1971 e 2015, proporcionado pela facilidade e custo na utilização. A energia solar, inserida em outras fontes, tem pequena participação no contexto geral.

Na origem da produção mundial de energia elétrica, era predominante o uso de energias não renováveis, principalmente por serem de uso fácil e imediato. No Brasil, por ser um país com muitos recursos naturais, especialmente com muitos corpos de água, adotou-se intensamente as energias renováveis (na sua maioria a energia hidrelétrica). Entretanto, a partir do século XXI, ocorreu um aumento no uso de energia não-renováveis na matriz elétrica brasileira, o que preocupa quanto ao meio ambiente, por ser o tipo de energia mais prejudicial para o mesmo. Houve um crescimento no uso de gás natural para geração de eletricidade, já a hidrelétrica diminuiu sua participação na geração. A tendência é que as termelétricas a gás natural ganhem cada vez mais força dentro do setor elétrico (EPE, 2016b).

No Distrito Federal (DF), uso da energia solar fotovoltaica é facilitado por sua posição geográfica e características climáticas locais, possibilitando uma elevada geração dessa energia pelo setor, com média anual de 5,8 kWh/m<sup>2</sup> no plano inclinado, onde ocorre o melhor direcionamento possível dos raios solares, o DF possui valor médio de irradiação diária maior do que a média nacional (SAUAIA, 2015; WWF, 2016).

## 2.4 Gases poluentes

Qualquer líquido, sólido ou gás que está presente no ar em uma concentração que pode causar problemas na saúde ou bem-estar dos seres humanos é considerado poluente do ar (Cooper; Alley, 2011). O gás carbônico é altamente conhecido pelo seu potencial de efeito estufa, que quando intensificado causa problemas ao equilíbrio do planeta e à saúde humana devido à sua inalação. Já o metano é um gás que tem o potencial de efeito estufa muito elevado, sua emissão tem aumentado e o setor energético junto com a agricultura são os que mais emitem esse tipo de gás (Ritchie; Roser, 2018b).

O gás carbônico é a medida para se analisar a quantidade de emissões de gases do efeito estufa, utiliza-se a medida dos gases em gás carbônico equivalente (CO<sub>2</sub>e). Ritchie e Roser (2018b) mostram que o gás carbônico é o maior causador do efeito estufa, seguido metano e outros gases, respectivamente. O CO<sub>2</sub>e é derivado da multiplicação da massa de emissões de um gás de efeito estufa específico pelo fator GWP100, que mede o impacto relativo de aquecimento de uma molécula ou massa unitária de um gás de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono ao longo de um período de 100 anos (Ritchie; Roser, 2018b). Assim, essa medida, CO<sub>2</sub>e, é a representação desses outros gases em forma de CO<sub>2</sub>.

## 2.5 Análise de custo

As externalidades ambientais são uma classe exclusiva de efeitos externos do mercado. Ocorrem com os impactos ambientais das atividades de produção e consumo; quando geram benefícios, chamados de externalidades positivas, ou custos não compensados, chamados de externalidades negativas (Eidelwein *et al.*, 2017). No decorrer dos anos, houve tentativas de incluir as externalidades ambientais dentro dos custos de eletricidade (Cohon, 2010; Epstein *et al.*, 2011; Wittenstein; Rothewll, 2015 *apud* Rhodes *et al.*, 2017).

Estima-se que as atividades dos setores primários da economia causem custos ambientais externos de US\$ 7,3 trilhões por ano, em média, no mundo. De acordo com números de 2009, esse valor equivale a 13% da produção econômica (Trucost, 2013 *apud* Eidelwein *et al.*, 2017). Tentar evidenciar essas externalidades o quanto antes pode significar em menores custos para a economia e a sociedade ao longo dos anos. Por exemplo, ações de redução nas emissões de gases de efeito estufa, que é uma das principais fontes de externalidades ambientais, poderiam custar cerca de 1% do PIB global a cada ano, menos do que o atual dano estimado desses gases, 5% (Stern, 2007 *apud* Eidelwein *et al.*, 2017).

O custo social da geração de eletricidade refere-se ao custo para a sociedade, inclui os custos privados, suportados por pessoas físicas, empresas ou outras entidades privadas que realizam uma ação, e os custos externos, sobre o meio ambiente e a sociedade. Atualmente, os custos externos não são expressos nos preços de mercado (WRC, 2007). Seria importante considerar diferentes questões ambientais para integrarem o custo. Entretanto, as interações ambientais são muito complexas, e os danos podem ocorrer longe da fonte e com atrasos significativos (Samadi, 2017).

Existem várias dificuldades na determinação dos custos sociais, ou seja, a estimativa de custo da mudança no bem-estar social resultante de uma mudança marginal nas emissões. Para estimar o CSC, são normalmente usados os Modelos Integrados de Avaliação (IAMs), que estimam custos de um determinado nível de mudança climática. Um IAM combina um modelo econômico global com um modelo do sistema climático físico e o ciclo do carbono. Uma questão importante relacionada à variabilidade das estimativas do CSC é a incerteza relacionada às futuras mudanças climáticas, assim como seus impactos econômicos e o potencial das sociedades para se adaptarem (Samadi, 2017).

## 3. METODOLOGIA

O fluxograma, Fig. 1, deve ser seguido de acordo com o tipo de energia em análise e suas tecnologias. Para o estudo, serão considerados: energia solar fotovoltaica e energia termelétrica a gás, de ciclo simples (somente turbina a gás para geração de energia) e de ciclo combinado (acrescenta uma turbina a vapor que aproveita o calor da turbina a gás para geração de energia).

Para a análise utilizada nesse estudo, serão consideradas as comparações entre a energia solar fotovoltaica e energia termelétrica a gás. A escolha da energia solar fotovoltaica se deu devido ao fato de ser uma matriz renovável e com poucos impactos ambientais relacionados. Em relação à energia termelétrica, a seleção foi feita por ser a energia que está nos planos de crescimento do setor energético para maior aumento na produção.

O estudo em foco visa fazer uma análise econômica comparativa da utilização das energias solar fotovoltaica e termelétrica a gás, utilizando no seu desenvolvimento fatores ambientais, que podem ser também impactantes na saúde humana, não apenas no meio ambiente. Assim, serão descritos o procedimento metodológico e seus materiais necessários para sua execução. Primeiramente, são calculadas as emissões dos gases para as diferentes tecnologias. Depois, são calculados os custos dessas emissões e os custos das tecnologias sem as externalidades ambientais. Por último, é feita uma comparação econômica sobre os valores com e sem as externalidades, e é definido quanto de impacto é gerado devido a quantidade de emissão de gases poluentes. Os valores utilizados são para o estudo de caso de implementação de energia solar fotovoltaica como fonte única de eletricidade no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, definindo seu tamanho necessário e os respectivos valores econômicos a partir da utilização de energia elétrica média do local.

Em relação aos gases poluentes, foram considerados os gases do efeito estufa como CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, e os poluentes do ar como SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>, para que pudesse ver a influência separada dos GEE e dos outros poluentes.

As fontes de dados foram diversas, apresentavam diferentes unidades monetárias e cotações. Então, todos os valores monetários foram convertidos para o real brasileiro (R\$) de 2018, média das cotações diárias de 2018 para o dólar (\$).

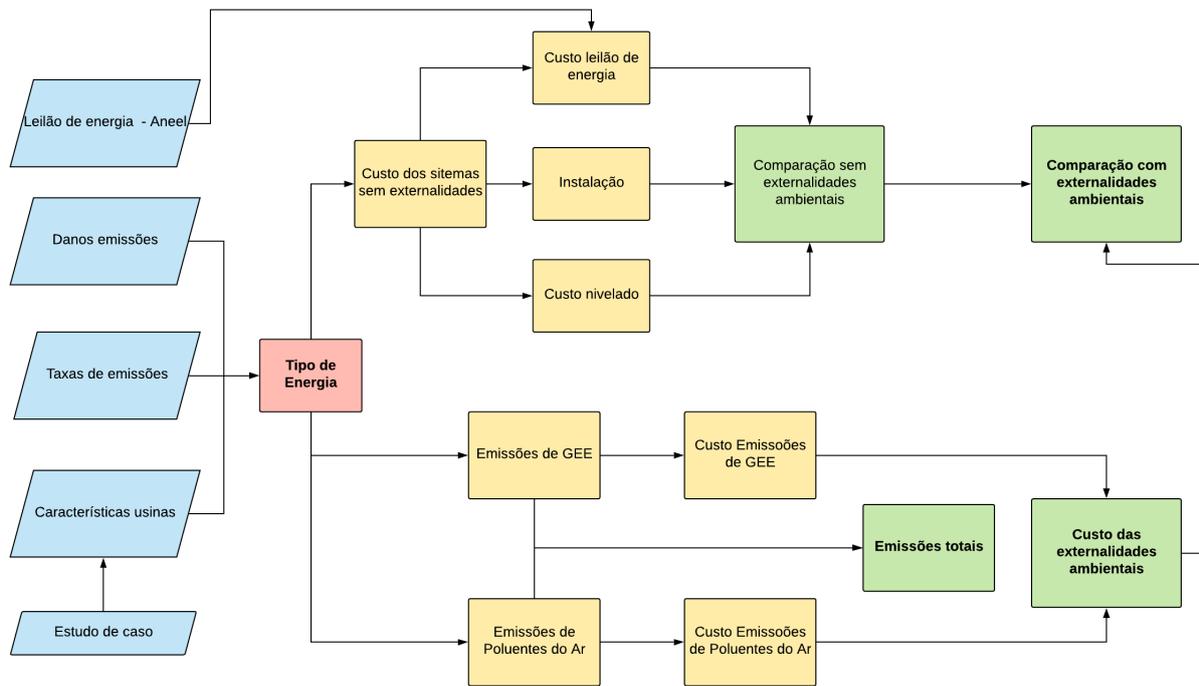


Figura 1 - Fluxograma da Metodologia.

### 3.1 Emissões de gases do efeito estufa e poluentes do ar

O primeiro passo é o cálculo das emissões dos gases, onde foram considerados os gases do efeito estufa e os poluentes do ar. Para este estudo, é definido como relevante, para gases do efeito estufa, o gás carbônico e o metano; e para os poluentes do ar, o dióxido de enxofre, os óxidos de nitrogênio, e os materiais particulados de diâmetro menor que 10 e 2,5 micrômetros. Essas escolhas se deram pelo potencial de aquecimento global, efeito na saúde e a disponibilidade de dados, como foi explicado na revisão bibliográfica.

A Eq. (1) apresenta a somatória das emissões totais ( $Emissões_{Totais}$ ) a partir da escolha dos poluentes para análise, que será feita para as duas classificações de poluentes mencionadas anteriormente

$$Emissões_{Totais} = \sum_{j \in \theta} Emissões_{j,k} \quad (1)$$

Onde:

$Emissões_{Totais}$  : Emissões totais (toneladas);

$Emissões_{j,k}$  : Emissões tipo  $k$  de um poluente  $j$ , sendo  $\theta$  o conjunto de poluentes que inclui  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$  (toneladas).

Para fazer a somatória das emissões na Eq. (1), é necessário calcular a emissão de cada poluente individualmente. Nesta etapa, é preciso saber qual é o tipo de emissão ( $k$ ) do poluente (implantação, descomissionamento ou operação). Emissões de implantação e descomissionamento são emissões únicas que acontecem na construção da usina/materiais ou no processo de descomissionamento, respectivamente. As emissões de operação podem ser de combustão (quando há queima direta para a geração de energia) ou não (vazamento pelas tubulações ou extração do combustível utilizado).

A Eq. (2) utiliza valores de potência e taxa de emissão com unidades de massa por unidades de potência pois são dependentes da capacidade de operação da usina. Já a Eq. (3) é contínua, então precisa saber da produção de energia ao longo de todo o tempo de operação, utilizando assim a taxa de emissão com unidades de massa por unidades de energia e o consumo médio de energia no estudo de caso.

Quando  $k$  é de implantação ou descomissionamento, usa-se a Eq. (2):

$$Emissões_{j,k} = R_{j,k} \times P \times 10^{-6} \quad (2)$$

Quando  $k$  é de operação, usa-se a equação (3):

$$Emissões_{j,k} = R_{j,k} \times C_m \times VU \times 10^{-6} \quad (3)$$

Onde:

$R_{j,k}$  : Taxa de emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (g/kW);

$P$  : Potência da usina (kW).

$R_{j,k}$  : Taxa de emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (g/kWh);

$C_m$  : Consumo médio energia elétrica (kWh/ano);

$VU$  : Vida útil da usina (anos).

Será analisada, então, a produção de poluentes no decorrer dos anos, início e fim. Quando forem analisados os números de poluição, deve-se relacionar com a capacidade do tipo de energia termelétrica em cada ano e nas projeções para os próximos anos. As emissões fugitivas do metano representam as emissões que escapam por algum processo do sistema energético, como a obtenção de combustível ou tubulações com vazamento.

Tabela 1 - Taxas de emissão do ciclo de vida (g/kW(h)) de CO<sub>2</sub>-eq (GEE), as taxas de emissão de combustão (g/kWh) de poluentes atmosféricos e as taxas de emissões de CH<sub>4</sub> (g/kWh) associado às tecnologias consideradas.

Tecnologia	Implantação (g CO <sub>2</sub> - eq/kW)	Operação* (g CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	Descomissionamento (g CO <sub>2</sub> -eq/kW)	Combustão (g/kWh)					Fugitivo CH <sub>4</sub> * (g/kWh)
				SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	CO <sub>2</sub>	
Termelétrica a gás natural ciclo combinado (TGCC)	160.000	74,4	6390	0,003	0,022	0,054	0,05	341,5	1,58
Termelétrica a gás natural ciclo simples (TGCS)	6.800	85,8	98,6	0,005	0,133	0,054	0,05	517,9	2,39
Solar PV	1.630.000	0	37.800	0	0	0	0	0	0

\*: Assumindo uma taxa média de vazamento da estrutura e do metano de 1%.

Fonte: (Rhodes *et al.*, 2017) adaptado.

### 3.2 Custo de gases do efeito estufa e poluentes do ar

As externalidades nas Eq. (4) refletem o custo das emissões no aquecimento global e na saúde humana. A emissões de gases com efeito de estufa estão numa base equivalente ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>-eq) associada a emissões únicas no início (ou seja, a construção de uma central energética), emissões de operação de não combustão e combustão (ou seja, extração de combustível, combustão de CO<sub>2</sub>, etc), e emissões de descomissionamento das centrais elétricas (Rhodes *et al.*, 2017). A Eq. (4) mostra como se calcula os custos das emissões:

$$Custo_{emissões} = \sum_{j \in \theta} (Emissões_{j,k} \times Dano_{j,k}) \quad (4)$$

Onde:

$Custo_{emissões}$  : Custo econômico das emissões (R\$);

$Dano_{j,k}$  : Dano econômico da emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (R\$/toneladas).

Os danos, custos sociais ou valor das externalidades, das usinas estão expostos na Tab. 2 e na Tab. 3, de acordo com o tempo de vida das usinas, a taxa de desconto e a taxa do setor.

Os danos contínuos do CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> foram estabelecidos de acordo com as médias dos anos de operação, que foi assumido de 2020 até 2045 (25 anos de vida útil). Fabricantes de módulos de silício cristalino garantem vida útil de 25 anos nos produtos (CRESESB, 2014).

Tabela 2 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton), custos sociais, de CO<sub>2</sub> (combustão e não-combustão) e CH<sub>4</sub> (emissões fugitivas) para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação, implantação e descomissionamento.

Poluente	Dano	Tempo (Anos)	Taxa de desconto	
			5%	3%
CO <sub>2</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	61,84	190,39
	Implantação (R\$/ton)	0 (2020)	43,87	153,53
	Descomissionamento (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	84,08	233,95
CH <sub>4</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	3,029	6,184

Fonte: (Estados Unidos, 2016a; Estados Unidos, 2016b).

As taxas de desconto servem para representar um valor no ano em análise de um pagamento futuro, ou seja, o quanto de dinheiro seria necessário agora para pagar os danos ambientais no futuro. As taxas de desconto usadas foram de 5%

como representação do mercado brasileiro devido a taxa de juros brasileira ser próxima, e 3% como representação do mercado nos Estados Unidos da América (Estados Unidos, 2016a; Estados Unidos 2016b).

O Grupo de Trabalho Interagencial (*Interagency Working Group* - IWG) utilizou Modelos Integrados de Avaliação (IAMs) para a obtenção dos valores dos gases do efeito estufa. Utilizou 3 Modelos Integrados de Avaliação (IAMs), DICE, PAGE e FUND. Esses IAMs, as melhores ferramentas para estimar o CSC, combinam processos climáticos, crescimento econômico e *feedbacks* (Estados Unidos, 2016a; Estados Unidos 2016b).

Tabela 3 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton) de poluentes do ar para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação.

Poluente	Dano	Tempo (Anos)	Taxa do setor		
			Baixa	Média	Alta
SO <sub>2</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	6.821	35.641	115.148
NO <sub>x</sub>			1.331	7.201	17.181
PM <sub>10</sub>			713	4.076	15.024
PM <sub>2,5</sub>			8.265	78.666	428.059

Fonte: (Muller, 2011; NRC, 2010; Fann *et al.*, 2012 *apud* Brown *et al.*, 2017).

### 3.3 Custo dos sistemas energéticos sem externalidades ambientais

O custo nivelado da energia/eletricidade (LCOE) é uma medida tipicamente usada para comparar diferentes tipos de geração de eletricidade, com unidade R\$/kWh, onde significa a quantidade de dinheiro gasta por uma fonte de eletricidade ao produzir um kWh de eletricidade na sua vida útil. Rhodes *et al.* (2017) explica que o LCOE oferece várias vantagens, como a capacidade de normalizar custos em um formato consistente através de décadas e tipos de tecnologia.

O custo nivelado total pode ser obtido com a equação a seguir, Eq. (5):

$$Custo_{Nivelado\ Total} = Custo_{Nivelado} \times VU \times C_m \times 10^{-3} \quad (5)$$

Onde:

$Custo_{Nivelado\ Total}$ : Custo nivelado total da usina (R\$);

$Custo_{Nivelado}$ : Custo nivelado da usina por produção de energia (R\$/MWh).

O custo nivelado da energia (LCOE) foi obtido através da calculadora do *Webber Energy Group* disponível na internet (Webber, 2014). O *Webber Energy Group* é um grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Texas em Austin que aborda questões críticas de energia e meio ambiente na interseção entre engenharia, política e comercialização. O grupo é composto, principalmente, por pesquisadores acadêmicos de graduação e pós-graduação, e profissionais de uma variedade de disciplinas de engenharia, política e ciência. A Tab. 4 expõe os valores de cada parâmetro utilizado no cálculo do LCOE para as diferentes tecnologias que serão comparadas no trabalho.

Tabela 4 - Dados para o cálculo do custo nivelado de energia (LCOE) para cada tecnologia diferente, usando como base valores da EPE

	Unidade	TGCC	TGCS	FV
Potência usina (MW)	MW	4	4	13,5
Fator de capacidade (%)	%	70	30	24
Custo do combustível	R\$/MMBtu	37	37	0
Taxa de calor	Btu/kWh	6550	9300	0
Custo fixo de operação e manutenção	R\$/kW-ano	66	48	69
Custo variável de operação e manutenção	R\$/MWh	22	15	0
Custo de investimento	R\$/kW	4021	2924	6397
Taxa de juros	%	5	5	5

Fonte: (EPE, 2016a; EPE, 2016b).

O valor de potência da usina para as termelétricas foi definido a partir da análise da demanda máxima nos dias úteis de 2017 na UnB, sendo 4 MW maior do que qualquer valor desse mesmo ano (Gregorio, 2017). Entretanto, para suprir a mesma energia na geração fotovoltaica, o sistema deve ter uma potência maior, pois não há irradiação 24 horas por dia. Assim, foi definido 5h de sol pleno para suprir 2.000.000 kWh/mês, 66.667 kWh/dia, resultando em, aproximadamente, 13,5 MW para suprir a energia diária demandada.

### 3.4 Estudo de caso: Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

O campus Darcy Ribeiro da UnB tem a área total de 3.950.579,07 m<sup>2</sup>, onde 552.171,40 m<sup>2</sup> representa a área construída, e possui aproximadamente 40.000 pessoas usando seu espaço. (UNB, 2012). A Tab. 5 mostra os valores utilizados para comparação entre as diferentes tecnologias no estudo de caso do trabalho, o Campus Darcy Riberio da

Universidade de Brasília. Os valores de potência das usinas foram estabelecidos de acordo com o consumo médio de energia elétrica no campus Darcy Ribeiro da UnB (2.000.000 kWh/mês).

O consumo de energia da UnB foi utilizado como um valor médio, aproximado do valor presente na conta de energia da universidade. Os valores de ponta e fora de ponta foram somados, resultando num valor de 1.982.192 kWh/mês, arredondado para 2.000.000 kWh/mês (Bertasso, 2016).

Tabela 5 - Dados utilizados para o estudo de caso no Campus Darcy Ribeiro da UnB, tendo em vista o que seria necessário para utilização da energia elétrica em 100% do campus.

Dados Estudo de Caso	Unidade	Valor
Consumo Médio Ano	kWh/ano	24.000.000
Consumo Médio Mês	kWh/mês	2.000.000
Consumo Médio Dia	kWh/dia	66.667
Potência FV Usina*	kW	13.500
Potência Gás Natural Max. Necessária*	kW	4.000
Vida Útil Usinas	Anos	25
Custo por Wp Usina FV*	R\$/Wp	3,66
Custo completo UTE TGCC médio*	R\$/kW	4.021,05
Custo completo UTE TGCS médio*	R\$/kW	2.924,40
LCOE UTE TGCC médio 5%*	R\$/MWh	318,03
LCOE UTE TGCS médio 5%*	R\$/MWh	453,28
LCOE FV médio 5%*	R\$/MWh	248,57

\*: Referente aos valores necessários para suprir a energia média consumida na UnB.

Fonte: (Bertasso, 2016; Greener, 2019; Mgonja; Saidi, 2017; Rhodes *et al.*, 2017).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As quantidades de poluentes emitidos, em toneladas, foram calculadas e expostas na Tab. 6, onde são divididas em emissões de gases do efeito estufa e poluentes do ar. Nos gases do efeito estufa, estão o gás carbônico, no qual representa valores internos de outros gases pela equivalência mostrada nos dados utilizados, e o metano. O gás carbônico, dividido em emissões de implantação, de descomissionamento, de operação e totais, que é a somatória das dessas três emissões anteriores. O metano é decorrente das emissões fugitivas, que vazam durante os processos do sistema de energia. Os poluentes do ar são divididos nos 4 poluentes considerados na metodologia, não considerando os GEE entre eles.

Percebe-se que a emissão total de CO<sub>2</sub> da energia fotovoltaica é muito menor do que as termelétricas, sendo que comparado à termelétrica a gás de ciclo combinado, menos poluente, a diferença é de mais de 10 vezes. Analisando as etapas de emissão desse gás, nota-se que as termelétricas causam poluição no momento de geração de energia, relacionado direto com o consumo de combustíveis, o gás natural. Ao contrário, a energia fotovoltaica não causa poluição no momento de geração de energia, visto que a sua fonte é a irradiação solar, não ocorrendo nenhuma queima e produção de gases. Entretanto, no processo de confecção dos painéis e instalação ocorre uma grande liberação do gás, fazendo com que seja a energia mais emissora nessa etapa. Para todas as tecnologias, as emissões de descomissionamento são pequenas porcentagens do total, podendo ser consideradas irrisórias.

Os resultados estão divididos em: custo dos gases do efeito estufa, e custo dos poluentes do ar separados e totais. Como o foco do estudo é avaliar a situação no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, foram definidos como prioridade os valores com a taxa de desconto baixa, representante da situação brasileira, e a taxa baixa específica do setor, para trabalhar com valores mais otimistas. Entretanto, para os custos totais dos dois tipos de gases, foram expostos os valores para as duas taxas de desconto com as diferentes taxas específicas do setor, para que haja uma comparação. Lembrando que as diferentes taxas de desconto afetam apenas os gases do efeito estufa e as diferentes taxas específicas do setor, apenas os poluentes do ar.

Os valores na Tab. 7 representam os custos (R\$) das emissões dos gases de efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia durante os 25 anos de uso para o campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

As taxas de desconto têm um papel significativo nos valores, a diferença chega a ser de até 3 vezes. Para o estudo, foi adotado a taxa de desconto de 5% para a análise principal, por ser representativo para o Brasil, como descrito no capítulo anterior. Comparando os 2 tipos de energia na emissão de gases do efeito estufa, percebe-se que a diferença é 20 vezes, em média, o que deve ter sido agravado pela emissão do metano, um grande causador do aquecimento global.

Nos custos dos poluentes do ar, as diferenças das taxas específicas do setor elétrico são grandes, mostrando que são de grande influência também. Entretanto, não se definiu qual seria a taxa mais realista, por representarem a variação na literatura dos valores de danos para os poluentes do ar.

Considerando a porcentagem do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa, é possível observar o menor impacto possível da termelétrica a gás entre as relações mostradas, já que foram utilizadas as taxas que geram menos custos ambientais. Mesmo assim, 9% são referentes ao custo das externalidades ambientais, sendo um valor considerável e ainda mais poluente do que a energia fotovoltaica. Em contrapartida, pode-se fazer a mesma análise para a energia solar fotovoltaica. Constata-se que apenas 1% do custo total é o custo das externalidades ambientais, ou seja, quase desprezível. A maior parte dos custos das externalidades vem da construção dos sistemas fotovoltaicos, por exemplo, na obtenção da matéria prima para a construção dos painéis.

Em 25 anos, nota-se que a energia fotovoltaica pode contribuir significativamente para que não ocorram danos a saúde das pessoas e mudanças climáticas. Em todas as relações, a energia fotovoltaica foi vantajosa.

Tabela 6 - Emissões dos gases (ton) do efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.

		Emissão GEE (ton)				Emissão Poluentes do Ar - Operação (ton)				
		CO <sub>2</sub>				CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
		Total	Implantação	Descomissionamento	Operação					
Energia Termelétrica Gás Natural	Ciclo Combinado	250.206	640	26	249.540	948	2	13	32	30
	Ciclo Simples	362.248	27	0,4	362.220	1.434	3	80	32	30
Energia Solar	Fotovoltaica	22.515	22.005	510	0	0	0	0	0	0

Tabela 7 - Custos (R\$) das emissões dos gases de efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.

		Custo GEE (R\$)		Custo Poluentes do Ar (R\$)			Custo da Emissão dos Poluentes do Ar (R\$) – taxa baixa do setor			
		5% taxa de desconto	3% taxa de desconto	Taxa baixa do setor	Taxa média do setor	Taxa alta do setor	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
Energia Termelétrica Gás Natural	Ciclo Combinado	18.333.458	53.476.642	300.890	2.651.261	13.762.606	12.278	17.564	23.095	247.953
	Ciclo Simples	26.744.800	77.835.255	397.694	3.173.639	15.045.029	20.463	106.182	23.095	247.953
Energia Solar	Fotovoltaica	1.008.176	3.497.835	0	0	0	0	0	0	0

O resultado mais expressivo se dá com a taxa de desconto média, aonde se tem o maior percentual das externalidades ambientais para as termelétricas a gás, por motivos já apresentados no texto. Infere-se, portanto, que a mudança na taxa de desconto causa bastante alteração nos resultados e que os gases do efeito estufa possuem o papel principal nas externalidades.

A influência de cada tipo de externalidade no custo total do sistema é mostrada na Fig. 2. Percebe-se que a mudança nas taxas específicas do setor gera uma diferença significativa no percentual dos poluentes do ar. Os custos dos sistemas fotovoltaicos são predominantemente os custos sem externalidades (em azul), mostrando o baixo impacto da energia fotovoltaica no meio ambiente.

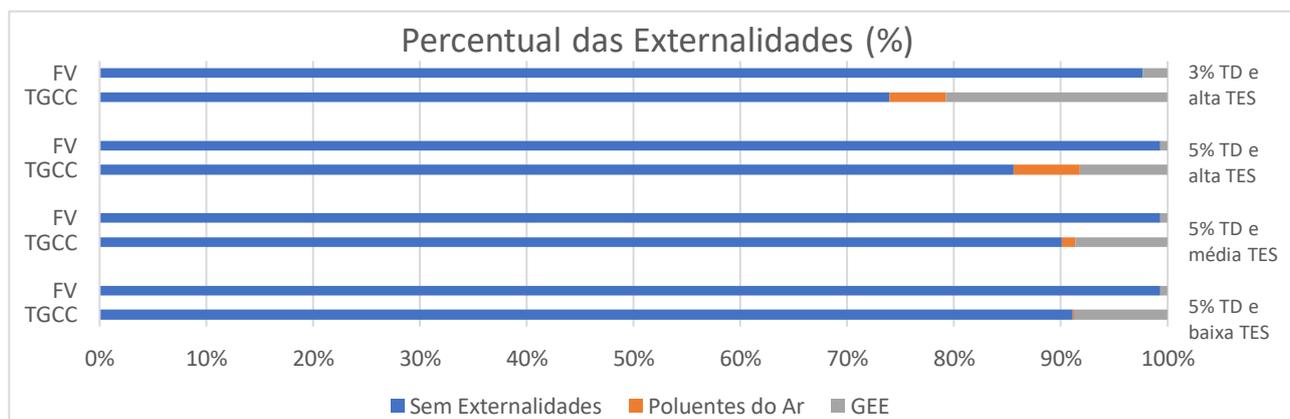


Figura 2 - Percentual (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC e FV com diferentes taxas de desconto (TD) e taxas específicas do setor (TES).

Os resultados com taxa específica baixa e taxa de juros baixa foram considerados como referência, pois são os valores mínimos em termos de ocorrência de poluição e economia. Assim, qualquer mudança nesses parâmetros causaria apenas acréscimo dos custos das externalidades, principalmente para as termelétricas a gás, visto que os danos mais significativos são ao longo dos anos e essas alterações afetam mais na geração de energia, onde a energia fotovoltaica não causa poluição.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Por fim, é importante destacar que as relações dos seres humanos com o meio ambiente devem ser cada vez mais utilizadas, pois um tem efeito no outro. Esse tipo de análise mostra os impactos das externalidades ambientais em análise econômica de projetos. Vários setores não levam em conta essas externalidades, o que é um problema, visto os resultados

desse trabalho para o setor energético. Espera-se que os resultados desse estudo sirvam para mais incentivo em pesquisas ambientais na área de energia e na utilização de energias renováveis, como é o caso da energia fotovoltaica. Assim, caminhar em busca do desenvolvimento sustentável por parte das empresas e do governo, e que a população esteja ciente dos problemas que o setor de energia elétrica causa sobre suas vidas.

Uma das principais conclusões do estudo de caso foi que, para o Campus Darcy Ribeiro da UnB, os valores de emissões são altos. As emissões de gases do efeito estufa das termelétricas são muito maiores do que a fotovoltaica. Os poluentes do ar são emitidos em menores quantidades, porém possuem efeitos diferentes e não ocorrem na energia fotovoltaica. Para a instalação da usina no campus, seria necessário o investimento de aproximadamente 50 milhões de reais.

As externalidades ambientais analisadas foram significativas nos custos dos sistemas. Os gases do efeito estufa foram mais relevantes do que os poluentes do ar. Para baixo custo, as emissões de gases do efeito estufa da energia termelétrica com ciclo simples custaram R\$ 26.744.800, enquanto na energia fotovoltaica, R\$ 1.008.176, mais de 20 vezes menor.

Quase 25% do custo total da TGCC com 3% de taxa de desconto e taxa específica média são das externalidades ambientais, mostrando como é significativo esse valor para esse tipo de energia elétrica. Na energia fotovoltaica, a porcentagem das externalidades no custo total é muito pequena. Mesmo variando as taxas de desconto e as taxas específicas do setor, os valores dos custos ainda ficaram altos e maiores para as termelétricas, como visto na Fig. 8.

A evidência dos custos ambientais nas contas de energia vai fazer com que se tenha cada vez mais práticas para reduzir as externalidades, reduzindo os principais causadores de problemas ambientais.

É importante ressaltar as incertezas nos custos sociais dos poluentes, área que ainda carece de mais pesquisas por se tratar de danos subjetivos e esperados.

## REFERÊNCIAS

- Bertasso, R. M. Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Sistemas Fotovoltaicos em Edifícios Públicos Universitários. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 100p.
- Brown, K. E. et al. How accounting for climate and health impacts of emissions could change the US energy system. *Energy Policy*, [s.l.], v. 102, p.396-405, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.052>.
- Cohon, J. L. Hidden costs of energy: unpriced consequences of energy production and use. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- Cooper, C. D.; Alley, F. C. *Air Pollution Control: A Design Approach*. 4. ed. Long Grove, US: Waveland Press, 2011. 839 p.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=481>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- Eidelwein, F. et al. Internalization of environmental externalities: Development of a method for elaborating the statement of economic and environmental results. *Journal of Cleaner Production*, [s.l.], v. 170, p.1316-1327, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.208>.
- EPE - Empresa De Pesquisa Energética. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 452. 2016a.
- EPE - Empresa De Pesquisa Energética. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 417. 2016b.
- Epstein, P. R. et al. Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals Of The New York Academy Of Sciences*, [s.l.], v. 1219, n. 1, p.73-98, fev. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x>.
- Estados Unidos. Interagency Working Group. Addendum to Technical Support Document on Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis under Executive Order 12866: Application of the Methodology to Estimate the Social Cost of Methane and the Social Cost of Nitrous Oxide. [s.l.], 2016a. 20 p. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/addendum\\_to\\_sc-ghg\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/addendum_to_sc-ghg_tsd_august_2016.pdf). Acesso em: 30 maio 2019.
- Estados Unidos. Interagency Working Group. Technical Support Document - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis: Under Executive Order 12866. [s.l.], 2016b. 35 p. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc\\_co2\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf). Acesso em: 30 maio 2019.
- Estados Unidos. EIA. U.S. Energy Information Administration. Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Washington, DC: EIA, 2013.
- Fann, N. et al. Characterizing the PM2.5-related health benefits of emission reductions for 17 industrial, area and mobile emission sectors across the U.S. *Environment International*, [s.l.], v. 49, p.141-151, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.08.017>.
- Greener. Estudo Estratégico: São Paulo: Enova Solar Energia Ltda, 2019. Color.
- Gregorio, J. V. Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.

- IEA - International Energy Agency. Energy and Climate Change. Paris: IEA, 2015. (World Energy Outlook Special Report).
- IEA - International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2017. Paris: IEA, set. 2017. Disponível em: <[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014a. 151 p.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). History. 2018. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/organization/organization\\_history.shtml](http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml)>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- Mai, T. et al. Exploration of high-penetration renewable electricity futures. Renewable Electricity Futures Study. p. 280. 2012.
- Mgonja, C. T.; Saidi, H. Effectiveness on Implementation of Maintenance Management System For off-Grid Solar PV Systems In Public Facilities: A CASE STUDY OF SSMP1 PROJECT IN TANZANIA. International Journal Of Mechanical Engineering And Technology. [s.l.], p. 869-880. jul. 2017.
- Muller, N. Z. et al. Environmental Accounting for Pollution in the United States Economy. American Economic Review, [s.l.], v. 101, n. 5, p.1649-1675, ago. 2011. American Economic Association. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.101.5.1649>.
- NRC - National Research Council (Estados Unidos). Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use. Washinton D.C: National Academies Press, 2010. 506 p.
- ONU - Organização Das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- Rhodes, J. D. et al. A geographically resolved method to estimate levelized power plant costs with environmental externalities. Energy Policy, [s.l.], v. 102, p.491-499, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.025>.
- Ritchie, H.; Roser, M. CO<sub>2</sub> and other Greenhouse Gas Emissions. 2018b. Publicado no OurWorldInData.org. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- Samadi, S. The Social Costs of Electricity Generation—Categorising Different Types of Costs and Evaluating Their Respective Relevance. Energies, [s.l.], v. 10, n. 3, p.1-36, 13 mar. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en10030356>.
- Sauaia, R. Proposta para a Energia Solar Fotovoltaica no GDF. ABSOLAR. Novembro, 2015.
- Stern, N. Stern Review: the Economics of Climate Change. 2007.
- Trucost. Natural Capital at Risk: the Top 100 Externalities of Business. 2013.
- UNB - Universidade de Brasília (Org.). UnB em Números. 2012. Disponível em: <[http://www.dpo.unb.br/images/phocadownload/unbemnumeros/folder/Unbemnumeros\\_12.pdf](http://www.dpo.unb.br/images/phocadownload/unbemnumeros/folder/Unbemnumeros_12.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2019.
- Webber, M. E. Levelized Cost of Energy Calculator. 2014. Desenvolvida por Webber Energy Group. Disponível em: <[https://www.energy101.com/calculators/calculators/calculator\\_LCOE\\_old/index.html](https://www.energy101.com/calculators/calculators/calculator_LCOE_old/index.html)>. Acesso em: 12 jun. 2019.
- Wittenstein, M.; Rothewll, G. Projected costs of generating electricity. 2015. ed. Paris, França: International Energy Agency., 2015.
- WRC - Waikato Regional Council (Nova Zelândia). Environmental Costs of Electricity Generation. [s.l.]: Waikato Regional Council, 2007. 31 p.
- WWF - Brasil. Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília. Brasília: WWF-Brasil, 2016.

#### **PRICE EVALUATION FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AND NATURAL GAS THERMAL ELECTRIC ENERGY: A CASE STUDY FOR UNIVERSITY OF BRASILIA'S CAMPUS**

**Abstract.** Bearing in mind the growth plan of the Brazilian electricity matrix and the environmental problems of electricity generation, it is researched the environmental benefits of solar photovoltaic energy over natural gas energy, in order to analyze and quantify these benefits for 100% of electricity consumed at Darcy Ribeiro Campus of the University of Brasilia Therefore, it is necessary to measure the emissions of polluting gases from solar photovoltaic energy and natural gas energy to fully supply the electricity consumption of the University of Brasilia Darcy Ribeiro Campus, to quantify the costs of the environmental externalities of solar photovoltaic energy and natural gas energy, compare the costs of energy systems without environmental externalities, and relate the costs of environmental aspects in comparing the economic costs of energy systems. The installation cost of a photovoltaic plant on the studied place is 50 million reais on average. Then, a research is performed about the impacts of greenhouse gases and air pollutants on energy generation from the two sources and the systems' costs. Given this, it appears that natural gas combined cycle generates 10 times more greenhouse gases than photovoltaic energy for the case study, greenhouse gases are more emitted than air pollutants, and 23% of the total cost with externalities for natural gas combined cycle power plants with average discount rate and average specific rate refer to the cost of environmental externalities, which confirms that photovoltaic energy is more environmentally beneficial than natural gas energy.

**Key words:** Photovoltaic energy, Environmental externalities, Gas thermoelectric.