

# **CUSTOS DA ENERGIA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL OU FOTOVOLTAICA INCLUINDO AS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS NO SETOR RESIDENCIAL DO DISTRITO FEDERAL**

**Heloísa Helena Bredemann** (UnB) - heloisabredemann@gmail.com

**Shayan Monajem Fathezam** (UnB) - smfathezam@gmail.com

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

## **Resumo:**

*Este estudo proporciona uma análise na dicotomia entre o crescente aumento da demanda energética proporcionada pelo desenvolvimento econômico e a tentativa de redução de emissões de gases causadores da mudança climática. Leva em conta a tendência do país de adotar tecnologias que utilizam o gás natural como fonte energética e o crescimento mundial de investimentos utilizando painéis fotovoltaicos, sendo proporcionada uma comparação do Custo das Externalidades e os Custos Privados de cada fonte energética para suprir o consumo do setor residencial de Brasília, utilizando o Levelized Cost of Energy (LCOE) como método para a aquisição de resultados. Os custos privados das fontes de energia foram adotados do 30º Leilão de Energia Nova A-6 da CCEE, enquanto os dados das emissões e custo dos GEE foram adquiridos por revisões bibliográficas. Os resultados obtidos para o LCOE Ambiental para a termelétrica a gás natural de ciclo simples, ciclo combinado e fotovoltaica, respectivamente, foram de 228,98 R\$/MWh; 143,77 R\$/MWh e 10,04 R\$/MWh para o Carbon Price Floor. Os resultados do Carbon Pricing Act foram calculados para dois cenários diferentes de aumento do custo do carbono, resultando em 22,49 R\$/MWh; 14,12 R\$/MWh e 0,99 R\$/MWh para o primeiro cenário e 33,05 R\$/MWh; 20,75 R\$/MWh e 1,44 R\$/MWh para o segundo. Por fim, para o Output Base Pricing os resultados foram de 120,81 R\$/MWh; 75,85 R\$/MWh e 5,27 R\$/MWh. Observa-se um custo reduzido para a energia fotovoltaica em comparação com a termelétrica a gás natural de ciclo simples ou combinado quando a externalidade ambiental das emissões de GEE são internalizadas na LCOE.*

**Palavras-chave:** *Levelized Cost of Energy, Energia Fotovoltaica, Termelétrica a Gás Natural*

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

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

# CUSTOS DA ENERGIA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL OU FOTOVOLTAICA INCLUINDO AS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS NO SETOR RESIDENCIAL DO DISTRITO FEDERAL

**Shayan Monajem Fathezam** – smfathezam@gmail.com

**Heloísa Helena Bredemann da Silva** – heloisabredemann@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.** Este estudo proporciona uma análise na dicotomia entre o crescente aumento da demanda energética proporcionada pelo desenvolvimento econômico e a tentativa de redução de emissões de gases causadores da mudança climática. Leva em conta a tendência do país de adotar tecnologias que utilizam o gás natural como fonte energética e o crescimento mundial de investimentos utilizando painéis fotovoltaicos, sendo proporcionada uma comparação do Custo das Externalidades e os Custos Privados de cada fonte energética para suprir o consumo do setor residencial de Brasília, utilizando o Levelized Cost of Energy (LCOE) como método para a aquisição de resultados. Os custos privados das fontes de energia foram adotados do 30º Leilão de Energia Nova A-6 da CCEE, enquanto os dados das emissões e custo dos GEE foram adquiridos por revisões bibliográficas. Os resultados obtidos para o LCOE Ambiental para a termelétrica a gás natural de ciclo simples, ciclo combinado e fotovoltaica, respectivamente, foram de 417,67 R\$/MWh; 332,46 R\$/MWh e 92,48 R\$/MWh para o Carbon Price Floor. Os resultados do Carbon Pricing Act foram calculados para dois cenários diferentes de aumento do custo do carbono, resultando em 211,18 R\$/MWh; 202,81 R\$/MWh e 83,43 R\$/MWh para o primeiro cenário e 221,74 R\$/MWh; 209,44 R\$/MWh e 83,88 R\$/MWh para o segundo. Por fim, para o Output Base Pricing os resultados foram de 309,50 R\$/MWh; 264,54 R\$/MWh e 87,71 R\$/MWh. Observa-se um custo reduzido para a energia fotovoltaica em comparação com a termelétrica a gás natural de ciclo simples ou combinado quando a externalidade ambiental das emissões de GEE são internalizadas na LCOE.

**Palavras-chave:** Levelized Cost of Energy, Energia Fotovoltaica, Termelétrica a Gás Natural

## 1. INTRODUÇÃO

Os debates presenciados, na realidade, giram em torno de como a sociedade pode continuar se desenvolvendo com uma quantia limitada de recursos do planeta Terra. Esse conceito foi capaz de gerar acordos internacionais abordando compromissos para a redução de danos ao meio ambiente, de forma a garantir uma perspectiva de qualidade de vida para gerações futuras, como foi o caso do Acordo de Paris, visando a redução de gases de efeito estufa na atmosfera. O consumo de energia apresenta uma curva crescente, ao mesmo tempo em que os recursos fósseis são limitados e responsáveis pelo aumento de gases de efeito estufa na atmosfera. Este trabalho apresenta uma proposta para quantificar em valor monetário o impacto ambiental causado pela emissão dos gases de efeito estufa de duas fontes de energia, uma renovável e outra não renovável, e somar este valor ao custo convencional da energia, chamado de LCOE Ambiental. Dessa forma será possível apresentar a relevância desses impactos para a sociedade, em uma unidade facilmente reconhecida, e passível de comparação.

O Brasil, um dos países associados ao Acordo de Paris, deve apresentar até 2050 uma redução significativa das emissões de gases de efeito estufa. Felizmente, o território possui um grande potencial hídrico, eólico e solar para o desenvolvimento de tecnologias renováveis geradoras de eletricidade, entretanto o país tem caminhado para políticas públicas contrárias ao potencial. O gás natural, por exemplo, recebe incentivos do Mercado Novo de Gás para a exploração em águas profundas da camada pré-sal brasileira ao mesmo tempo em que um reajuste nos incentivos da geração de energia por solar fotovoltaica da Resolução 482/2012 é revisto pela ANEEL, assim promovendo cada vez mais o uso de uma fonte de combustível fóssil, como o gás natural, enquanto desestimulam a utilização de fontes renováveis, como a solar, para atender e diversificar a produção de eletricidade no país.

A partir do cenário do aumento do consumo de energia, da consequente necessidade de novas instalações geradoras, bem como a assinatura de um acordo internacional para desenvolver políticas públicas redutoras das emissões de gases de efeito estufa e o caminho contrário que algumas políticas brasileira têm tomado, será apresentada uma comparação entre o custo da energia fotovoltaica e das termelétricas a gás natural para o setor residencial do Distrito Federal. O cálculo será baseado no método proposto por Rhodes et. al. (2016) de forma a considerar o custo convencional de energia, encontrado nas vendas do leilão de energia somado à parcela do custo de carbono, estimada por meio da aplicação de uma taxa pigouviana sobre o carbono equivalente dos principais gases de efeito estufa: CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma metodologia desenvolvida por Rhodes et. al. (2016) apresenta um cálculo alternativo para o *Levelized Cost of Energy* (LCOE) ao contabilizar as externalidades ambientais decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas diversas fontes de geração de energia, incluindo a termelétrica a gás natural e a solar fotovoltaica, para os municípios dos Estados Unidos. A LCOE, por sua vez, representa o custo nivelado que permite incluir parâmetros na análise para mostrar um valor representativo do custo do investimento em uma fonte energética em comparação com outra. Através do LCOE é possível inserir dados de entrada referente às características tecnológicas das instalações e das emissões de poluentes atmosféricos. Os critérios de custos foram considerados para cada local com base nas externalidades negativas, para posteriormente serem internalizados nos custos de geração elétrica.

Para a avaliação das externalidades negativas foram estudados os conceitos de Arthur Pigou (1932), onde são determinadas como externalidades toda interferência que um terceiro sofre com a transação voluntária entre comprador e vendedor. Quando o custo da externalidade é somado com o custo privado do empreendimento gera-se o custo social. Esse conceito é aplicado também para a poluição, ao referenciá-la como um custo. Utilizando o princípio de poluidor - pagador, é possível internalizar o custo para o gerador da poluição. Este método está sendo adotado por países como Canadá, Singapura e Reino Unido como uma ferramenta redutora de emissão de gases de efeito estufa, por meio da aplicação de valores monetários para uma quantidade de CO<sub>2</sub> produzida em uma determinada atividade. Para o escopo deste trabalho foram adotadas políticas aplicadas para a produção de energia elétrica, onde serão referidas como taxas pigouvianas.

De acordo com a *Environment and Climate Change Canada* (2019) o *Output Base Pricing* passou a ser adotado pelo Canadá em janeiro de 2019 para grandes emissores de gases de efeito estufa no setor elétrico. A taxa iniciou-se com C\$20 dólares/tonCO<sub>2</sub> para o ano de 2019, apresentando um acréscimo anual de C\$10 dólares/tonCO<sub>2</sub> até 2022. Similarmente, Singapura adotou o *Carbon Pricing Act* em 2019 com a meta de redução de 16% das emissões de gases de efeito estufa, aplicando valores fixos de S\$5/tonCO<sub>2</sub>q até 2023 para adequação das indústrias e modificando esse valor para S\$10/tonCO<sub>2</sub> ou S\$15/tonCO<sub>2</sub> até 2030 de acordo com a *Government Gazette* (2018).

No Reino Unido a aplicação de um preço sobre a emissão de CO<sub>2</sub> iniciou em 2013 com a implementação do *Carbon Price Floor*, aplicado em fontes de energia derivadas de combustíveis fósseis. De acordo com a *Revisão de Custo de Energia* (2017) foram gerados £1 bilhão em impostos diretamente dessa política, resultando tanto no desincentivo de investimentos em produções de energia elétrica utilizando fontes fósseis, como também afetando diretamente a produção de dióxido de carbono. Segundo o relatório apresentado por David Hirst (2018), o custo do carbono se encontra constante em £30/tonCO<sub>2</sub> até 2030 e será aumentado para £70/tonCO<sub>2</sub> após 2030. Este aumento está relacionado aos danos causados pelo aumento de GEE caso a concentração de CO<sub>2</sub> total continue com a taxa de crescimento atual.

A concentração das emissões de GEE resultante de uma fonte geradora de eletricidade é apresentada em vários estudos a partir da análise do ciclo de vida (ACV) de cada etapa de implementação, operação e descomissionamento da usina. Devido a discrepância entre os resultados, alguns autores propuseram uma harmonização dos dados, a fim de obter um resultado mais conciso sobre cada fonte. Para a de gás natural, O'Donoghue et. al. (2014) analisou 254 publicações sobre o uso de eletricidade de gás natural. Elaborou etapas de filtragem para excluir resultados inconsistentes para a análise e aplicou uma harmonização sistemática e técnica nos dados. A harmonização verifica a ocorrência de resultados próximos a limites de estimativa de diferença entre si (entre 25% e 75%), ou seja, os valores consistentes. Dados fora dessa estimativa têm seus parâmetros ajustados para uma média dos resultados consistentes. A harmonização sistemática realiza uma comparação de dados equivalentes, enquanto a técnica ajusta às condições operacionais representativas da geração de energia por gás natural. Seguindo a mesma linha de pensamento, Hsu et al. (2012) analisou 397 estudos referentes a ciclos de vida de placas fotovoltaicas e suas emissões de GEE, para possível comparação e obtenção das características de desempenho concisas das placas solares e harmonização dos dados.

## 3. METODOLOGIA

Dentro das perspectivas referente a escolha de uma determinada fonte de energia e as intensas discussões e debates acerca do impacto das emissões de gases de efeito estufa no aquecimento global, este estudo procurou apresentar uma metodologia baseada na aquisição de dados para realizar uma comparação do custo da energia elétrica quando parte desses impactos ambientais são incluídos como despesas.

### 3.1 Características instaladas

As perdas para a geração de energia estão associadas às características técnicas de cada tecnologia. As placas fotovoltaicas, por exemplo, por ter produção intermitente, deve incluir em seu cálculo o período de incidência solar no local onde será instalada e a performance da placa (*Performance Ratio*), que leva em consideração o rendimento do módulo com a eletricidade produzida e que é capaz de produzir. A termelétrica a gás natural, por outro lado, leva em consideração o Fator de Capacidade (FC). Vale ressaltar que o FC adotado para este estudo foram disponibilizados pela EPE (2016). Este pode ser determinado pela razão entre a produção de eletricidade em um período e a máxima eletricidade

que poderia ter produzido nesse mesmo período. Os valores adotados para este estudo foram 30% para a termelétrica de ciclo simples e 70% para as termelétricas de ciclo combinado.

Para a obtenção do valor de irradiação solar foi consultado a base de dados do programa SunData, do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito (CRESESB, 2019), a qual disponibiliza informações de 350 medidores da radiação solar média mensal. Foram coletados os dados e feito uma média mensal (MM) em kWh/m<sup>2</sup>, Eq. (1), da incidência da radiação em um ângulo de 15° de todos os 12 meses mensurados em 3 medidores presentes em Brasília. Escolheu-se a incidência solar em um ângulo de 15° pois, de acordo com Portal Solar (2019), para otimização dos painéis fotovoltaicos, adota-se o ângulo igual ao da latitude (-15,780 no caso de Brasília) voltado para o Norte.

$$I = \frac{MM_1 + MM_2 + MM_3}{3} \quad (1)$$

Foram adotados, para este estudo, a Irradiação de Brasília (I) e transformada para kWh/m<sup>2</sup>.ano de acordo com a Eq. (2). O tempo de vida escolhido foi de 25 anos baseado na garantia fornecida pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

$$\text{Irradiação Anual} = \text{Irradiação média diária} \times \text{Quantidade de dias em um ano} \quad (2)$$

De acordo com Portal Solar (2019), módulos de tecnologia policristalina - Si são as mais acessíveis financeiramente e a mais utilizada no mercado. Foi admitida a eficiência de acordo com o módulo PHK-36-SÉRIE-4BB disponibilizado por catálogo comercial. Tal escolha foi feita devido a maior potência em comparação as outras placas no mercado. A área para a instalação de painéis fotovoltaicos será em habitações já construídas, sendo contabilizadas as características do *Performance Ratio* de painéis solares instalados em telhados, levemente inclinados com suas faces voltadas para o norte, disponíveis nos valores harmonizados de Hsu et al. (2012). O tempo de vida escolhido foi de 25 anos baseado na garantia fornecida pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

Como a geração de energia fotovoltaica é intermitente, foi calculada uma potência superior à demanda diária do Distrito Federal para equilibrar-se em uma potência média durante os lapsos solares sem geração de energia. Foi admitida uma geração de energia por sistema fotovoltaico de grande porte e que operariam diretamente na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A Tab. 1 apresenta dados que refletem a realidade de painéis localizados no DF como também características encontradas no mercado.

Tabela 1 - Características dos painéis solares.

Parâmetros do sistema	Valor
Eficiência do Módulo Policristalino	17,46%
<i>Performance Ratio</i> (Telhados)	75%
Tempo de Vida do Sistema	25 anos
Irradiação	1993 kWh/m <sup>2</sup> .ano
Área de Cada Pannel	1 m <sup>2</sup>

### 3.2 Emissões de gases de efeito estufa

Para incluir no cálculo da LCOE o custo associado às externalidades ambientais resultantes do uso da tecnologia termelétrica a gás natural ou solar fotovoltaica, foi mensurado as emissões de GEE resultantes de todo o processo de ciclo de vida dos produtos.

Visando melhor aplicabilidade e inclusão dos principais gases que causam o efeito estufa – o Metano (CH<sub>4</sub>) e o Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) - foi definida uma padronização através dos seus respectivos potenciais de aquecimento global (GWP) retirados da AR5 do IPCC (2014) para um horizonte de 100 anos, apresentando como unidade o Dióxido de Carbono Equivalente (CO<sub>2</sub>eq). A equivalência pode ser calculada pela Eq. (3) e Eq. (4):

$$28 \times \text{Emissão de CH}_4 = \text{CO}_2 \text{eq de CH}_4 \quad (3)$$

$$265 \times \text{Emissão de N}_2\text{O} = \text{CO}_2 \text{eq de N}_2\text{O} \quad (4)$$

**Fotovoltaica.** Para se obter o valor de emissões totais de GEE e aplicar a LCOE ambiental, utilizou-se o estudo de Hsu et al. (2012), onde foram realizados cálculos de emissões de gases de efeito estufa por unidade de eletricidade gerada (GHG), g/kWh. Os dados de entrada são os dados de estudos que passaram por seleções, foram harmonizados e utilizados na Eq. (5). Este cálculo foi o mais utilizado dentro dos estudos do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos, dividindo as emissões dos processos de produção, instalação e descomissionamento pela energia gerada ao longo da vida do sistema. O parâmetro I representa a irradiação em kWh/m<sup>2</sup>.ano, *n* a eficiência do módulo em %, PR o valor de *Performance Ratio*, LT como sendo o tempo de vida do sistema em anos e A representando a área em m<sup>2</sup>.

$$GHG = \frac{W}{I \times n \times PR \times LT \times A} \quad (5)$$

O valor de W é obtido por meio da manipulação da Eq. (5), gerando a Eq. (6). Primeiramente foram utilizados os parâmetros harmonizados da bibliografia, para posteriormente inserir os parâmetros característicos de uma usina fotovoltaica de Brasília. O valor de GHG para cálculo de W obtido no estudo de Hsu et al. (2012) não inclui as emissões de Metano e Óxido Nitroso durante o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, porém o mesmo remete que as emissões de ambos gases contabilizam em 6% o valor total de GHG, sendo essa porcentagem acrescentada ao valor de GHG do estudo para descobrir o W.

$$W = (GHG \times 1,06) \times I \times n \times PR \times LT \times A \quad (6)$$

Os parâmetros utilizados para determinar W do estudo de Hsu et al. (2012) estão definidos na Tab. 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para calcular W.

Parâmetros harmonizados	Valores
Quantidade total de GEE por 1 kWh produzido	55 gCO <sub>2</sub> eq/MWh
Irradiação	1700 kWh/m <sup>2</sup> .ano
Eficiência do Módulo Policristalino	17,46%
<i>Performance Ratio</i> (telhados)	0,75
Tempo de Vida do Sistema	25 anos
Área do Módulo	1 m <sup>2</sup>

Com a obtenção do valor do W harmonizado, será calculado os valores de GHG de Brasília para a fotovoltaica aplicando as características dos painéis solares da Tab. 1 no denominador da Eq. 5. Considerando o resultado como o valor de emissão total do ciclo de vida para a placa fotovoltaica em g CO<sub>2</sub>eq /kWh.

Para efeitos de comparação entre resultados, houve a transformação de unidades de gCO<sub>2</sub>eq/kWh para tonCO<sub>2</sub>eq/MWh através da Eq. (7).

$$1 \text{ g CO}_2\text{eq /kWh} = 0,001 \text{ tonCO}_2\text{eq / MWh} \quad (7)$$

**Termelétrica a gás natural.** Para a determinação de gases de efeito estufa referente a termelétricas, foram analisados os resultados da harmonização sistemática e técnica obtidos por O'Donoughue et. al. (2014). Porém, o resultado apresentado foi de CO<sub>2</sub>eq total de todo o processo de ciclo de vida, onde foi necessária uma consulta bibliográfica da metodologia de Skone(2012), realizada pela *National Energy Technology Laboratory* (NETL) para estimar as emissões presentes no ciclo de vida das termelétricas a gás natural. Skone (2012) reuniu resultados característicos de cada etapa da ACV a partir das singularidades técnicas das indústrias termelétricas. Dentre eles: localização do poço de perfuração, gasto energético para o processamento do gás natural, material utilizado no gasoduto, emissões de metano de escape em função da distância do gasoduto, potência da usina e quantidade de gás utilizado para a geração de eletricidade. Por fim, ajustou as unidades de cada processo e aplicou os fatores de emissão disponíveis na AP-42 (US EPA), resultando nas emissões de GEE para cada etapa.

Através dos resultados de Skone (2012) foi possível verificar a acurácia das emissões de GEE de acordo com a quantidade apresentada da harmonização de O'Donoughue et. al. (2014), resultando na emissão de CO<sub>2</sub>eq para cada unidade de eletricidade produzida.

**Custo do carbono.** O custo do carbono é importante na implementação de políticas públicas e tomadas de decisões sobre um investimento devido ao custo da externalidade negativa que cresce a cada aumento de emissão. Nele pode ser incluído o custo de oportunidade ambiental para serviços ecossistêmicos, como também o valor monetário de custo na saúde, queda da produção agropecuária, entre outras atividades impactadas pelo aumento da concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera.

Com os valores das emissões geradas tanto das termelétricas a gás natural como da usina fotovoltaica, multiplica-se as emissões obtidas a cada 1 MWh para o total necessário de forma a atender o consumo residencial de Brasília, demonstrado na Eq. (8).

$$GHG \text{ Brasília} = GHG_1 \times \text{Consumo Elétrico Residencial de Brasília} \quad (8)$$

Com os resultados das emissões geradas pelo consumo residencial de Brasília e a produção, instalação e descomissionamentos das usinas para atender esse consumo, é possível aplicar as taxas pigouvianas.

A Eq. (9), Eq. (10) e Eq. (11) atribuem custos de carbono a cada emissão gerada. Os valores do custo de carbono se encontram nas respectivas moedas de cada país, sendo utilizados fatores de conversão do dia 16/10/2019 para transformação em reais (R\$). Sendo GHG Brasília a emissão de GEE de Brasília utilizando tecnologia  $i$  e  $i$  representando Termoeletrica Ciclo Simples, Termoeletrica Ciclo Combinado ou Painéis Fotovoltaicos.

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_i \times (\text{Custo Carbono Canada} \times 3,15) \quad (9)$$

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_i \times (\text{Custo Carbono Singapura} \times 3,04) \quad (10)$$

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_i \times (\text{Custo Carbono Reino Unido} \times 5,34) \quad (11)$$

### 3.3 Levelized cost of energy

O cálculo apresentado na Eq. (12) demonstra o custo total do investimento, ajustado pela taxa de juros no período. O  $\Pi_{\text{custocapita}}$  representa os custos capitais da usina energética, em \$/MW. Esta parcela leva em consideração a construção dos gasodutos para as termelétricas de gás natural;  $O\&M_{\text{fixo}}$  são os custos fixos de operação e manutenção, em \$/MW e é ajustado pelo CRF ou fator de recuperação do capital. O valor de 8760 representa a quantidade de horas para um ano e CF o fator de capacidade médio da vida útil da usina (Energia/Potência instalada) em MWh/MW. A parcela  $O\&M_{\text{variável}}$  são os custos variáveis de operação e manutenção em \$/MWh, realizados de acordo com desgaste da usina durante a geração de eletricidade. O preço do combustível, representado por  $\Pi_{\text{combustível}}$ , em \$/MMbtu, é o insumo que será utilizado para a geração de calor, portanto é necessário determinar o quanto de calor é necessário para a produção de uma unidade de energia, ou seja, a taxa de calor ou HR, em MMBtu/MWh. Dessa forma, o preço do combustível é pautado em função da unidade de calor utilizada, sendo apenas considerado para análise do LCOE de termelétricas.

$$LCOE = \frac{\pi_{\text{custocapital}} \times CRF + O\&M_{\text{fixo}}}{8760 \times CF} + O\&M_{\text{variável}} + HR \times \pi_{\text{combustível}} \quad (12)$$

O cálculo da LCOE é utilizado também como método para o cálculo do custo da energia elétrica pelos leilões de energia. Como os resultados desses leilões apresentam valores de venda para a energia atualizados aos parâmetros e incentivos do momento, a LCOE utilizada neste estudo foi baseada no 30º Leilão de Energia Nova A-6 realizado pela CCEE.

**Internalização das externalidades.** Por meio dos valores monetários atribuídos ao custo por emissão de carbono, é possível a geração do custo social, sendo ele a soma do custo privado (custo de manutenção, investimento, operação, entre outros) com o custo do carbono (custo dado às externalidades negativas que o aumento de gases de efeito estufa causam). No escopo deste trabalho, baseado no artigo de Rhodes et. al. (2016), o custo social é chamado de LCOE ambiental, onde será aplicado tanto para termelétricas, quanto para a fotovoltaica com o objetivo de comparar os resultados.

Seguindo o cálculo para a LCOE Ambiental, na Eq. (13) é apresentada a parcela para internalização das externalidades ambientais referentes às emissões de GEE. A variável  $R_j$  representa a taxa de emissão do poluente  $j$  em  $\text{CO}_2\text{eq}$  ( $\text{tonCO}_2\text{eq}/\text{MWh}$ ) e  $D_j$  o custo da externalidade  $j$  ( $\$/\text{tonCO}_2\text{eq}$ ). A variável  $\Theta$  corresponde aos poluentes analisados ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ). Os gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  transformados em  $\text{CO}_2\text{eq}$ , somados e multiplicados pelas respectivas taxas pigouvianas.

$$LCOE_{\text{amb}} = LCOE + \sum_{j \in \Theta} R_j \times D_j \quad (13)$$

## 4. RESULTADOS

Os parâmetros técnicos adotados para a geração de energia elétrica por solar fotovoltaica ou termelétrica a gás natural, promoveram resultados de custo para um cenário capaz de suprir o consumo de energia elétrica residencial de Brasília em um período de 25 anos. O último Anuário Estatístico de Energia Elétrica, publicado pela EPE (2018), apresentou o consumo do setor residencial do Distrito Federal (DF) com o ano base 2017, um total de 2.187.000 MWh/ano. Como será analisado um período de 25 anos, projetou-se um crescimento anual nesse consumo em 2,5% ao ano e foi determinada uma média de 3.156.542 MWh. A potência instalada necessária para cada tecnologia foi de 1201 MW e 515 MW para a termelétrica a gás natural de ciclo simples e combinado, respectivamente, e de 2112 MW para a solar fotovoltaica, potência suficiente para preencher os lapsos sem a geração de energia durante a noite.

A termelétrica a gás natural de ciclo combinado apresenta vantagem quanto à menor necessidade de potência instalada, porém, em casos onde há uma grande variação do consumo de energia elétrica, a de ciclo simples pode ser mais adequada devido a sua facilidade em oscilar a geração de energia. Como um sistema fotovoltaico opera apenas no período de luz solar no dia, necessita de uma potência quase cinco vezes maior que a do ciclo combinado para atender o mesmo consumo residencial de Brasília, encarecendo seu investimento para a instalação.

Por outro lado, o preço da energia fotovoltaica tem reduzido ao longo dos anos, apresentando-se inclusive menor que o de gás natural, conforme observado na Fig. 1. Os resultados foram baseados no preço de venda de energia elétrica dos resultados consolidados dos Leilões de Energia Nova da CCEE desde o ano de 2017.

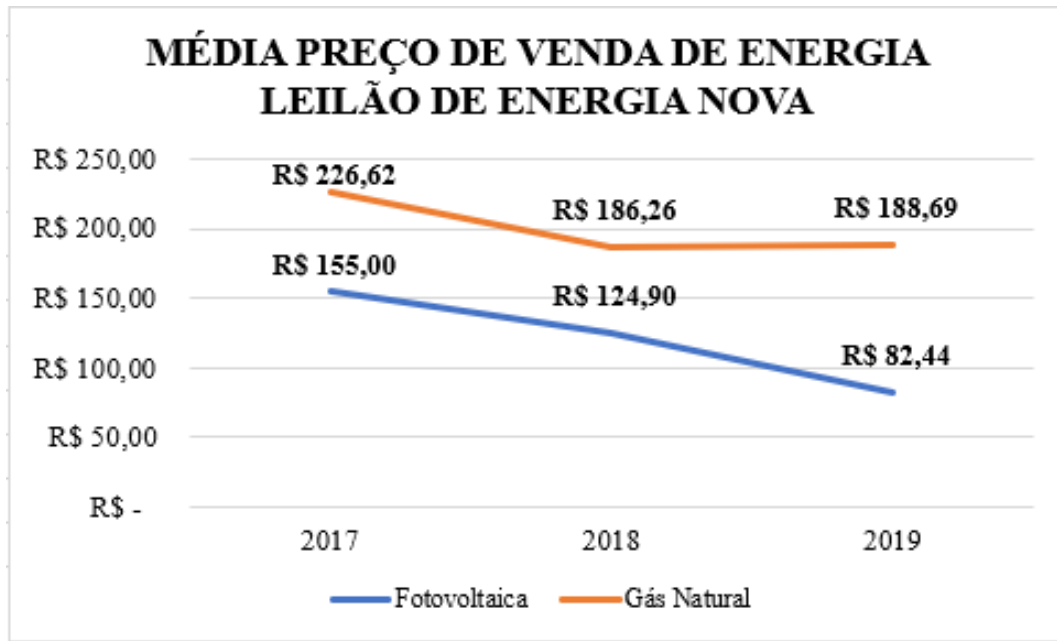


Figura 1 - Variação do preço de venda de energia pelos Leilão de Energia Nova da CCEE ao longo dos anos.

No cenário apresentado, o custo da instalação fotovoltaica representa-se o mais barato, sendo o valor mais atual o de R\$ 82,44 e R\$ 188,69 para a fotovoltaica e termelétrica a gás natural, respectivamente. É importante destacar que no leilão analisado não foi diferenciada a geração de energia a gás natural por termelétrica de ciclo simples e ciclo combinado. Como consequência pode apresentar valores subestimados para a de ciclo combinado e superestimado para as de ciclo simples. Além da instalação de fotovoltaica já apresentar um custo reduzido comparado à termelétrica a gás natural de ciclo simples, ainda há necessidade de avaliar o quanto seria esse valor caso fosse contabilizado o custo ambiental. Na Fig. 2 é ilustrado a quantidade de GEE emitido no total da ACV de cada fonte energética estudada.

Como o estudo realizado por Hsu et al. (2012) calcula a média do GHG harmonizado, tanto com irradiação anual de 1700 kWh/m<sup>2</sup>.ano quanto com 2400 kWh/m<sup>2</sup>.ano, foi atribuído a média de ambos os valores para comparar o resultado de GHG obtido para irradiação anual de Brasília. O cálculo do valor de GEE emitido por MWh, utilizando uma placa recebendo 1700 Kwh/m<sup>2</sup>/ano de irradiação e com eficiência no módulo entre 12,3% e 13%, gera uma média de emissão harmonizada de 0,048 ton/MWh. Entretanto, quando se compara o resultado entre um sistema recebendo 2400 ton/MWh com um sistema instalado em Brasília com as características da Tab. 1 (irradiação de 1993 Kwh/m<sup>2</sup>/ano) e se utiliza as características tecnológicas atuais (módulo até 5,1% mais eficiente) a mesma gera quase a mesma emissão por MWh, com uma irradiação incidente 16,9% menor. A comparação é apresentada na Tab. 3.

Tabela 3 – Comparação dos resultados de emissões de Gases de Efeito Estufa por MWh.

GHG (ton/MWh)		
Fotovoltaica	DF 1993 kWh/m <sup>2</sup>	0,035
	Min 2400 kWh/m <sup>2</sup>	0,034
	Max 1700 kWh/m <sup>2</sup>	0,048

A Fig. 2 apresenta a diferença de emissões totais durante o ciclo de vida de termelétricas para ciclo simples e ciclo combinado a partir dos dados da bibliografia de O'Donoghue et. al. (2014) e compara com o resultado obtido de um sistema fotovoltaico instalado no Distrito Federal.

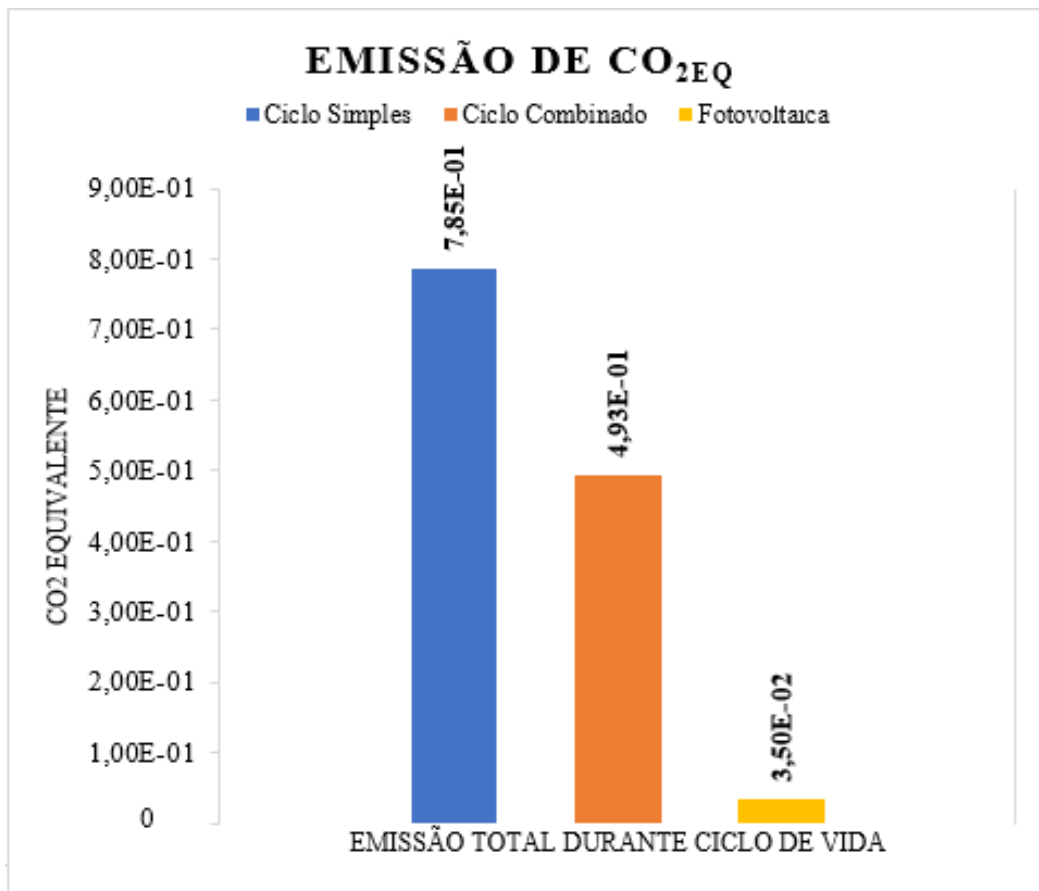


Figura 2 - Comparação de emissões de GEE em CO<sub>2</sub>eq para cada tipo de fonte energética analisada.

É possível observar que para as instalações de gás natural, as emissões de GEE são consideravelmente maiores que as de solar fotovoltaica. Essa parcela representa a soma total da variável R da Eq. 3 do carbono equivalente de todos os gases. Esse resultado será multiplicado pelas taxas pigouvianas do Reino Unido (*Carbon Price Floor*), de Singapura (*Carbon Pricing Act I e II*) e do Canadá (*Output Base Pricing*), com cada moeda ajustada para o valor do real. O valor das taxas de cada país e sua variação ao longo dos 25 anos de análise e seus respectivos custos sociais podem ser visualizados na Tab. 4.

Tabela 4 – Aumento da taxa pigouviana de cada país e seu respectivo custo anual para cada tecnologia geradora de energia.

Custo do Carbono no Reino Unido, Singapura e Canadá									
		Cotação Libra		R\$ 5,34					
		Cotação Dólar SGP		R\$ 3,04					
		Cotação Dólar CAN		R\$ 3,15					
		Taxas Pigouvianas		Custo Emissões Fotovoltaica		Custo Emissões Ciclo Simples		Custo Emissões Ciclo Combinado	
UK	2019 - 2030	R\$ 160,20		R\$ 5,61		R\$ 125,76		R\$ 78,98	
	2031 - 2045	R\$ 373,80		R\$ 13,08		R\$ 293,43		R\$ 184,28	
SGP		I	II	I	II	I	II	I	II
	2019 - 2023	R\$ 15,20	R\$ 15,20	R\$ 0,53	R\$ 0,53	R\$ 11,93	R\$ 11,93	R\$ 7,49	R\$ 7,49
	2024 - 2045	R\$ 30,40	R\$ 45,60	R\$ 1,06	R\$ 1,60	R\$ 23,86	R\$ 35,80	R\$ 14,99	R\$ 22,48
CAN	2019	R\$ 63,00		R\$ 2,21		R\$ 49,46		R\$ 31,06	
	2020	R\$ 94,50		R\$ 3,31		R\$ 74,18		R\$ 46,59	
	2021	R\$ 126,00		R\$ 4,41		R\$ 98,91		R\$ 62,12	
	2022 - 2045	R\$ 157,50		R\$ 5,51		R\$ 123,64		R\$ 77,65	

Para o resultado do valor de cada fonte energética com a internalização das externalidades ambientais, o custo das emissões é somado ao LCOE do 30º Leilão de Energia A-6. Apesar de atender ao princípio de poluidor-pagador, ao qual seria responsável por arcar com o prejuízo resultante de suas emissões, este prejuízo é distribuído no preço de venda do produto, ou seja, resulta em um maior valor ao LCOE. A Fig. 3 retrata o valor total para o LCOE Ambiental considerando a média dos valores para cada taxa pigouviana.

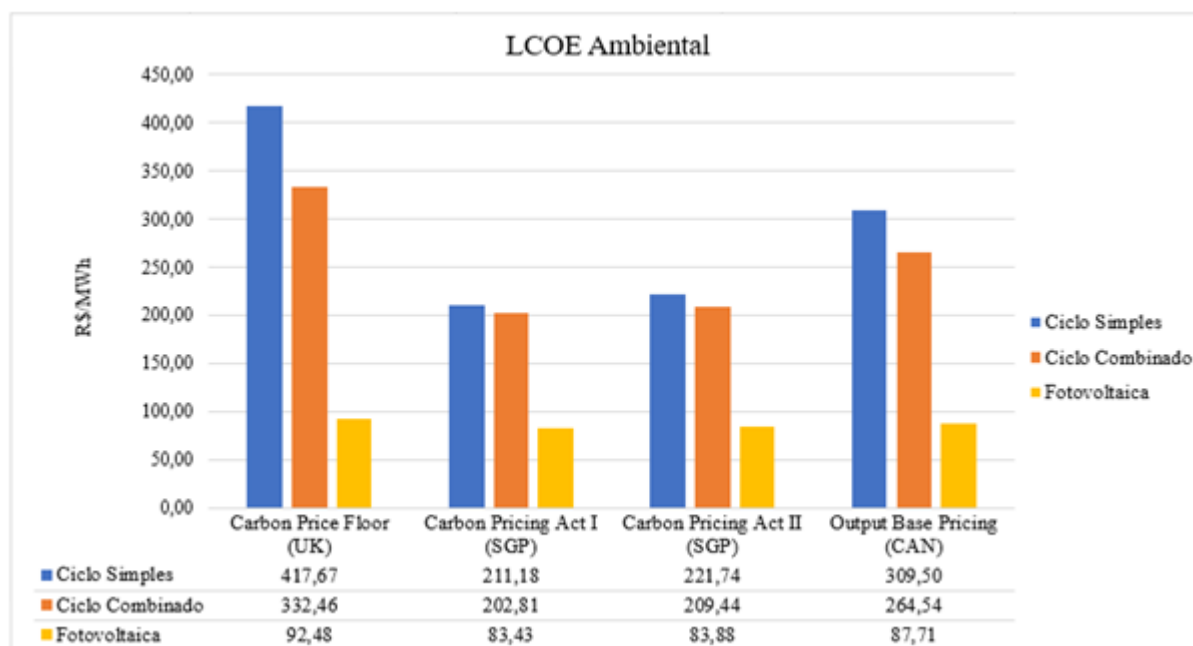


Figura 3 – Custo do LCOE Ambiental para cada taxa pigouviana e cada tecnologia de geração de eletricidade.

Observa-se um custo elevado para as termelétricas em comparação com a solar fotovoltaica devido a maior quantidade de emissões de GEE. Tratando-se ainda dos custos das emissões de GEE, será considerado qual valor seria gasto no total caso as emissões fossem convertidas para a sociedade do Distrito Federal, representando o custo adicional que um poluidor deveria arcar devido às externalidades negativas das emissões de GEE, refletidas por cada cidadão do DF. Será considerada a quantidade de habitantes do Distrito Federal em 2019 ajustada pela média do crescimento populacional em 0,99% ao longo de 25 anos e o consumo energético de 3.156.542 MWh ao ano.

Tabela 5 – Custo total anual das emissões de GEE para consumo de eletricidade residencial de Brasília dividido pela população do DF ao longo de 25 anos

População DF ajustada (Ano 2045)		3.441.089 habitantes		
Custo Total Anual Emissões de GEE				
Taxa Pigouviana	Custo Anual Ciclo Simples	Custo Anual Ciclo Combinado	Custo Anual Fotovoltaica	
UK	R\$ 722.793.788,03	R\$ 453.817.797,52	R\$ 31.691.681,97	
SGP I	R\$ 70.994.462,91	R\$ 44.575.024,48	R\$ 3.124.976,61	
SGP II	R\$ 104.318.394,47	R\$ 65.497.995,15	R\$ 4.545.420,52	
CAN	R\$ 381.328.341,64	R\$ 239.423.181,27	R\$ 16.634.976,49	
Custo Total de GEE por Cidadão (R\$)				
Taxa Pigouviana	Custo Anual Ciclo Simples	Custo Anual Ciclo Combinado	Custo Anual Fotovoltaica	
UK	R\$ 210,05	R\$ 131,88	R\$ 9,21	
SGP I	R\$ 20,63	R\$ 12,95	R\$ 0,91	
SGP II	R\$ 30,32	R\$ 19,03	R\$ 1,32	
CAN	R\$ 110,82	R\$ 69,58	R\$ 4,83	

O custo das emissões de GEE convertidos para a população apresentam resultados discrepantes entre as taxas pigouvianas adotadas. A do Reino Unido apresentou maior valor devido ao maior custo da moeda. Singapura, por sua vez, apresentou menores taxações para o carbono, refletindo em valores pouco significativos para um cidadão. O parâmetro de significância citado refere-se ao custo que um cidadão teria, caso precisasse consultar um médico devido externalidades na saúde, consequentes das emissões de GEE. Estima-se que uma consulta médica custe R\$ 250,00. Nenhuma das opções seria o suficiente para arcar com, pelo menos, uma consulta médica ao ano. Por outro lado, as taxas de carbono não podem apresentar-se tão alta de modo a afetar a competitividade do preço da energia no mercado.

Considerando o *Output Base Pricing* como um intermediário para fins comparativos, o custo da LCOE Ambiental aumentou em 64% o da termelétrica a gás natural de ciclo simples, 40% a de ciclo combinado e de 6,4% para a fotovoltaica em relação ao leilão de energia.

## 5. CONCLUSÃO

É importante observar que a necessidade do aumento da matriz energética é inevitável, porém, atualmente existem discussões e políticas para que seja realizado de forma mais sustentável. O Acordo de Paris entra nessa perspectiva, a fim de reduzir a quantidade de emissões de GEE na atmosfera. Os caminhos das políticas públicas brasileiras estão indo de encontro ao objetivo deste acordo ou dos objetivos do desenvolvimento sustentável, visto que o governo pretende reduzir incentivos à geração por fotovoltaicas e incentivar o Mercado Novo de Gás Natural.

Nos resultados foram apresentados o custo adicional ao LCOE calculado para os leilões de energia, caso fossem contabilizados os impactos ambientais. O resultado foi um LCOE Ambiental considerando a taxa pigouviana intermediária do Canadá, de 309,50 R\$/MWh e 264,54 R\$/MWh para as termelétricas a gás natural de ciclo simples e composto, respectivamente, e de 87,71 R\$/MWh para as fotovoltaicas. Isso representa um aumento 64%, 40% e 6,4% do custo original das fontes energéticas, levando em conta a taxa de crescimento do consumo dos habitantes do DF em 25 anos.

Apesar do custo das emissões de GEE não apresentarem valores consideráveis para os cidadãos do Distrito Federal, essa taxa é capaz de influenciar decisões de escolha de uma determinada fonte devido ao aumento do custo total, de modo a permitir um desincentivo a fontes de energia não renováveis e focar em energias limpas, como a fotovoltaica.

## REFERÊNCIAS

- Brasil. ANEEL. Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012. Disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.
- Canada. Environment and Climate Change Canada, 2019. Carbon pollution pricing: options for a federal ghg offset system. Disponível em <<https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/climate-change/pricing-pollution/Options-GHG-Offset-System.pdf>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.
- CRESESB, Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito, Potencial Solar - SunData v 3.0.,2019. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>> Acesso em: 06 de dezembro de 2019
- Donoughue, p. R. O. Et al.,2014. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generated from Conventionally Systematic Review and Harmonization. v. 18, n. 1, 2014.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética.,2016. Energia Termelétrica gás natural, biomassa, carvão, nuclear.v. 1, pp. 1 – 417.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética.,2018 Anuario Estatístico de Energia Elétrica 2018. Disponível em <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>> Acesso em: 06 de dezembro de 2019.
- Hirst,D.,2018. Carbon Price Floor (CPF) and the price support mechanism.House of Commons n° 05927.
- Hsu, D. D. Et al.,2012. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Systematic Review and Harmonization.
- IPCC,Fifth Assessment Report:Global Warming Potential Values.,2014.vol 5.
- Pigou, A.C.,1932 "II, Chapter IX: Divergences Between Marginal Social Net Product and Marginal Private Net Product" in The Economics of Welfare.vol 1,pp. 1-551.
- Portal Solar.,2019.A melhor direção do painel solar fotovoltaico. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.
- Rhodes,J. D., King,K., Gulen,G.,Olmstead,S. M.,Dyer, J. S.,Hebner,R. E., Breach, F. C., Edgar, T. F., Webber,M. E.,2016.
- Singapura, Government Gazette, 2018. Carbon Pricing Act 2018. Disponível em <<https://sso.agc.gov.sg/Acts-Supp/23-2018/20180601?DocDate=20180601#pr11->>>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.

## **COSTS OF ENERGY OF POWER PLANTS USING NATURAL GAS OR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INCLUDING ENVIRONMENTAL EXTERNALITIES IN THE RESIDENTIAL SECTOR OF THE FEDERAL DISTRICT**

**Abstract:** *This study provides an analysis of the disparity between the growing increase in energy demand provided by economic development and the attempt to reduce emissions of gases that cause climate change. It takes into account the country's tendency to adopt technologies that use natural gas as an energy source and the worldwide growth of investments using photovoltaic panels, providing a comparison of the Cost of Externalities and the Private Costs of each energy source to meet the residential consumption needs of Brasilia (DF), using the Levelized Cost of Energy (LCOE) as a methodology for ascertaining results. The private cost of energy sources was obtained from the 30th New Energy Auction A-6 of CCEE, while data on greenhouse gas emissions (GHG) and costs was gathered through systematic reviews of bibliography. The resulting figures for the Environmental LCOE for the single-cycle, combined-cycle natural gas thermoelectric plants and photovoltaic, respectively, were 228,98 R\$/MWh, 143,77 R\$/MWh and 10,04 R\$/MWh for the Carbon Price Floor. The results of the Carbon Pricing Act were derived from two different scenarios of rising carbon costs, resulting in 22,49 R\$/MWh, 14,12 R\$/MWh and 0,99 R\$/MWh for the first scenario and 33,05 R\$/MWh, 20,75 R\$/MWh and 1,44 R\$/MWh for the second. Finally, for Output Base Pricing, the respective figures were 120,81 R\$/MWh, 75,85 R\$/MWh and 5,27 R\$/MWh. We conclude that there is a reduced cost for photovoltaic energy compared to single-cycle or combined thermoelectric natural gas when the environmental externality of greenhouse gas emissions (GHG) is internalized in the LCOE.*

**Key words:** *Levelized Cost of Energy (LCOE), Photovoltaic Energy, Thermoelectric Natural Gas*