

# ANÁLISE COMPARATIVA DAS FONTES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, HIDRELÉTRICA E TERMELÉTRICA, COM LEVANTAMENTO DE CUSTOS AMBIENTAIS, APLICADA AO DISTRITO FEDERAL.

Lara Raquel de Jesus Rodrigues Silva – lararaquelrodrigues@gmail.com

Rafael Amaral Shayani – shayani@ene.unb.br

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira – mago@ene.unb.br

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** O setor elétrico brasileiro é suprido basicamente por fontes termelétricas e hidrelétricas, no momento presente, porém essas fontes provocam impactos ambientais relevantes. O aumento esperado no consumo de energia para os próximos anos possivelmente provocará a exaustão desses recursos, em que a crise energética se agravará com a escassez de recursos hídricos despertando assim a necessidade de inserção de novas fontes, preferencialmente as renováveis, para evitar essa possível situação de crise. Nesse contexto, essa pesquisa tem o intuito de fazer uma análise comparativa da energia solar fotovoltaica com as principais fontes de energia elétrica já utilizadas no Brasil, hidrelétrica e termelétrica, considerando dimensões ambientais e econômicas, visando a diversificação da matriz energética. Para tal espera-se identificar as vantagens e desvantagens das energias solar, hidrelétrica e termelétrica, comparando impactos ambientais e ponderando, de forma qualitativa, os mesmos permitindo assim verificar qual a opção que, sob uma ótica mais abrangente, é mais atrativa. A partir das análises realizadas observa que é mais interessante investir na tecnologia solar fotovoltaica, pois apresenta menores impactos socioambientais e tem perspectiva de desenvolvimento a longo prazo. Levantou um cenário de desenvolvimento da energia solar fotovoltaica para a cidade de Brasília, visando analisar o benefício e a utilização da fonte solar fotovoltaica nos próximos 20 anos no respectivo local.

**Palavras-chave:** Fontes Renováveis, Solar Fotovoltaica, Análise Comparativa.

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação de projetos de geração de energia elétrica têm provocado impactos, tanto negativos quanto positivos, nos meios econômico, social e ambiental; e também tem gerado discussões, principalmente nos dias de hoje, em que a demanda energética tem atingido patamares elevados decorrentes da crescente urbanização e da inserção tecnológica.

O quadro de recursos energético mundial é marcado pela utilização de insumos fósseis, como o petróleo e carvão; eles são os maiores responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera (Bruckner et al., 2014). Apesar da Convenção Quadro sobre Mudança do Clima, do protocolo de Quioto e do Acordo de Paris (COP21) as emissões cresceram mais rapidamente na última década do que anteriormente (IEA, 2016). Por esse fator surge a necessidade de buscar novos recursos energéticos que reduzem as emissões associadas a ações antrópicas, como a emissões de gases poluentes.

Atualmente o setor elétrico brasileiro é suprido basicamente por fontes hidrelétricas e termelétricas, porém essas fontes provocam impactos ambientais relevantes. O aumento esperado no consumo de energia para os próximos anos (EPE, 2015) possivelmente fará com que esses recursos não sejam suficientes para atender o crescimento esperado, possibilitando a intensificação da crise energética com a escassez de recursos hídricos, desperta a necessidade de inserção de novas fontes, preferencialmente as renováveis, para evitar essa possível situação de crise.

O objetivo geral da pesquisa é fazer uma análise comparativa da energia solar fotovoltaica com as principais fontes de energia elétrica já utilizadas no Brasil, considerando dimensões ambientais e econômicas, visando a diversificação da matriz energética. Como objetivo específico, espera-se identificar as vantagens e desvantagens das energias solar, hidrelétrica e termelétrica a gás natural para diferentes perspectivas, com o intuito de comparar os impactos ambientais e ponderá-los, de forma qualitativa, permitindo assim verificar qual a opção que, sob uma ótima mais abrangente, apresenta o melhor custo-benefício, além de simular um cenário de crescimento da energia solar em Brasília.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.2 Panorama mundial

O consumo de energia elétrica cresce ao passar dos anos muito por causa do crescimento econômico. Esse elevado consumo de energia utilizando recursos fósseis faz com que o setor de geração de energia seja o maior contribuinte mundial para emissão de gases de efeito estufa (Bruckner et al., 2014).

A despeito dos desafios impostos ao setor energético, em especial o aquecimento global e a busca por uma matriz energética cada vez mais renovável, os combustíveis fósseis seguem figurando como estratégicos para atender, de forma energeticamente segura, a crescente demanda de energia (EPE, 2016). Entre 2000 e 2014 o fornecimento total

de energia primaria (FTEP) cresceu 40% globalmente, nesse período a China mais que duplicou sua oferta, apresentando 22,4% do FTEP mundial (IEA, 2016). O consumo de carvão cresceu 4% por ano durante 2000-2010 e diminuiu o ritmo entre 2010-2012. Energias renováveis contribuíram com 13,5% do FTEP globais em 2010 (Bruckner et al., 2014).

Em 2014, 16,4% da eletricidade do mundo foi gerada pela hidroeletricidade, também nesse ano, mais de 22% da produção de eletricidade foi decorrente das energias renováveis, incluindo as hidrelétricas, ficando atrás apenas do carvão e gás natural (IEA, 2016). As fontes de energia eólica e solar são as que apresentaram maior crescimento na última década, visto que a geração de energia proveniente dos ventos aumentou cerca de 7 vezes e a capacidade acumulada de energia solar fotovoltaica aumentou em média 49% por ano (IEA, 2015). Nesse mesmo ano, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2015), o carvão mineral contribuiu com 40,8% da eletricidade gerada no mundo, tornando-o a principal fonte de geração elétrica, superando a participação do gás natural.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) do fornecimento de energia per capita nos países em desenvolvimento estão abaixo da média global, mas a diferença está diminuindo por consequência do crescimento econômico e de um consumo elevado de combustíveis fósseis (Bruckner et al., 2014).

## 2.2 Panorama brasileiro

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é um sistema composto por fontes despacháveis, em sua maioria, e pode ser caracterizado pela existência de usinas hidrelétricas com grandes reservatórios de regularização e um parque termelétrico instalado. Entretanto é notória a dificuldade de se construir grandes reservatórios, principalmente na região da bacia amazônica, o que promove a necessidade de diversificação da matriz elétrica, com uma consequente expansão significativa das fontes renováveis, em especial as intermitentes como eólica e solar fotovoltaica.

A hidroeletricidade é uma tecnologia madura e confiável que tem sido a principal fonte do sistema elétrico brasileiro por sua competitividade econômica, além de ser uma fonte de geração renovável, porém requer um elevado investimento inicial para construção de projetos hidrelétricos de grande porte. A geração de energia elétrica proveniente das usinas hidrelétricas corresponde a mais da metade da matriz geradora de eletricidade nacional (Fig. 1).

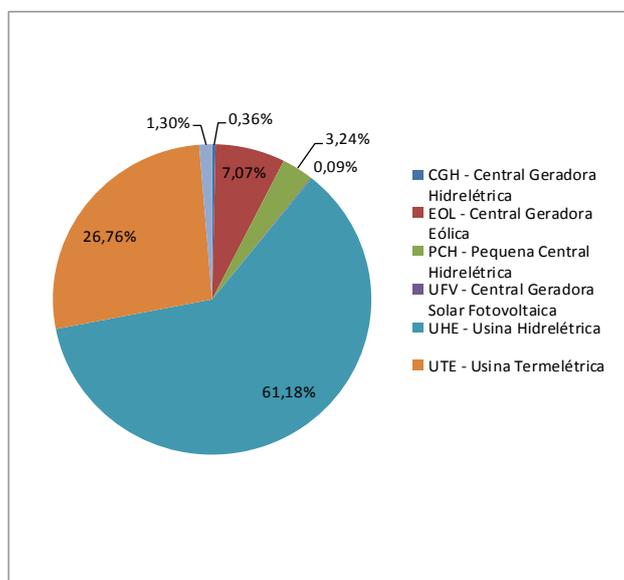


Figura 1: Composição da matriz elétrica brasileira em 2017.

Fonte: Elaborada com base nos dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL.

O parque termelétrico ocupa o segundo lugar na matriz elétrica brasileira (Fig. 2) e utiliza uma variedade de combustíveis, sendo os mais relevantes o carvão, o óleo, o gás natural e a biomassa. O carvão tem se tornado uma opção importante no sistema energético nacional por estar disponível em abundância e a preços relativamente baixos no sul do Brasil e poder suprir parte do setor energético que tem se desfalcado em função do esgotamento do potencial hidrelétrico ambientalmente e economicamente viável em longo prazo (EPE, 2015).

De acordo com a Tab. 1, o carvão mineral corresponde a 3,3 GW da capacidade do parque gerador termelétrico atual brasileiro. As usinas termelétricas a gás natural são as que mais contribuem para geração de energia elétrica no Brasil seguido das termelétricas a biomassa, usando o bagaço de cana.

De acordo a ANEEL (2017), a potência fiscalizada é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

Tabela 1: Usinas do tipo UTE em operação nacional em 2017.  
 Fonte: Elaborado a partir de dados da ANEEL (2017).

| <b>Usinas Termelétricas no Brasil</b> |  |                                  |                    |
|---------------------------------------|--|----------------------------------|--------------------|
| <b>Combustível</b>                    |  | <b>Potência Fiscalizada (kW)</b> | <b>Porcentagem</b> |
| Bagaço de cana de Açúcar              |  | 11.042.010                       | 27,0%              |
| Biogás                                |  | 124.305                          | 0,3%               |
| Calor de Processo                     |  | 211.700                          | 0,5%               |
| Capim Elefante                        |  | 65.700                           | 0,2%               |
| Carvão Mineral                        |  | 3.317.465                        | 8,1%               |
| Carvão Vegetal                        |  | 41.197                           | 0,1%               |
| Casca de Arroz                        |  | 45.333                           | 0,1%               |
| Gás de Alto Forno - Biomassa          |  | 114.265                          | 0,3%               |
| Gás de Alto Forno - CM                |  | 390.130                          | 1,0%               |
| Gás de Refinaria                      |  | 315.560                          | 0,8%               |
| Gás Natural                           |  | 12.977.729                       | 31,7%              |
| Lenha                                 |  | 14.650                           | 0,04%              |
| Licor Negro                           |  | 2.261.136                        | 5,5%               |
| Óleo Combustível                      |  | 4.057.993                        | 9,9%               |
| Óleo Diesel                           |  | 4.692.838                        | 11,5%              |
| Óleos vegetais                        |  | 4.350                            | 0,01%              |
| Outros Energéticos de Petróleo        |  | 980.328                          | 2,4%               |
| Resíduos Florestais                   |  | 386.100                          | 0,9%               |
| <b>Totais</b>                         |  | <b>41.042.790</b>                | <b>100%</b>        |

O parque termelétrico de carvão mineral atualmente conta com três usinas nacionais, é complementado com plantas à carvão importado que consomem cerca de 1,5 milhão de toneladas ao ano. A grande quantidade de carvão importado se dá pelo fato do carvão nacional ser de baixa qualidade por manifestar, como características básicas, alto teor de cinzas e enxofre (EPE, 2016)

As termelétricas a gás natural ganham espaço por serem consideradas como fonte energética mais limpa dentre os combustíveis fósseis. O gás natural é considerado um combustível de queima limpa, pois ao se comparar com outros combustíveis fósseis, ele emite menos CO<sub>2</sub> e gases poluentes (EPE, 2016). A capacidade instalada correspondente a usinas termelétricas a gás natural no Brasil é de aproximadamente 13 GW, isso corresponde 32% das térmicas em operação no país e 8,68% da potência instalada (ANEEL, 2016).

O parque gerador brasileiro conta com a participação muito ativa da biomassa, sendo que as usinas termelétricas (UTE) que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar ocupam 27% da capacidade de geração das termelétricas nacionais (Tab. 1). O bagaço de cana-de-açúcar está relacionado a processos industriais e vem sendo utilizado nas usinas de etanol e açúcar para cogeração de energia elétrica e calor.

O Brasil está situado numa região com incidência mais vertical dos raios solares. Esta condição favorece elevados índices de irradiação em quase todo o território nacional. Essas condições conferem ao país algumas vantagens para o aproveitamento energético do recurso solar (EPE, 2016). Atualmente a energia proveniente do sol totaliza 137 MW e tende a crescer 10% ao ano até 2050, sendo 37 GW de geração distribuída (EPE, 2015).

Novas tecnologias menos agressivas de módulos fotovoltaicos já estão sendo desenvolvidas, sendo que a maioria delas pode ser reciclada: o vidro protetor, a estrutura de alumínio e, especialmente, o material semicondutor ativo e o metal caro que forma os eletrodos (Desideri et. al., 2012) fazendo com que os impactos ambientais se reduzam e haja uma redução no custo de produção.

No contexto atual, de mudança climática e necessidade de redução das emissões globais de gases de efeito estufa, a integração de fontes renováveis intermitentes no sistema elétrico tem encontrado espaço e se tornado inevitável. A expectativa de crescimento energético nacional para os próximos 30 anos é 4 vezes superior a atual, apresentando uma baixa na oferta de energia proveniente de hidrelétricas e um crescimento expressivo da bioenergia (Fig. 2). O Brasil tem feito grande uso de fontes renováveis de energia (potencial hidráulico, de biomassa, eólico e solar) com o objetivo de crescimento seguro, econômico e de acordo com a legislação ambiental. Porém nenhuma energia é limpa em sua totalidade, todas apresentam impactos econômicos, ambientais e sociais.

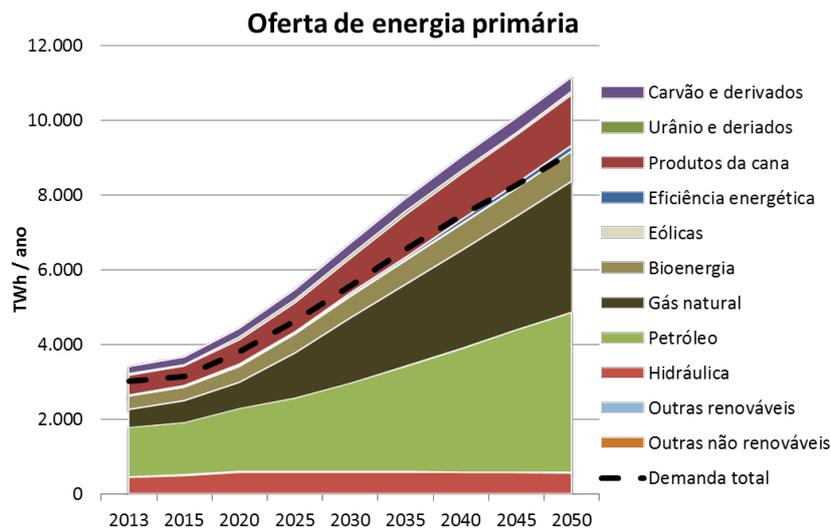


Figura 2: Oferta de energia primária de 2013 a 2050.  
Fonte: EPE Plano Nacional de Energia 2050.

### 3. MÉTODOS E MATERIAIS

Diversas metodologias de Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) já foram desenvolvidas, porém ainda não há uma que seja completamente aceita como eixo de avaliação (Cremones et al., 2014). A metodologia utilizada nesse estudo consiste em separar, inicialmente, os impactos ambientais por tipo de fonte de energia e tabelar, usando como critério principal a influência ambiental e social, suas vantagens e desvantagens de acordo com a demanda de cada grupo que se beneficia da energia. Os impactos não foram segregados pelas etapas de construção e operação, mas por pontos de vista do governo, do usuário, dos agentes do setor e da sociedade como um todo. Então fará é feita uma comparação entre as fontes, visando identificar qual a de menor grau de impacto socioambiental na sua totalidade (Fig. 3). A partir desses dados é realizada uma valoração dos impactos ambientais qualitativamente, pois dados quantitativos são escassos e de difícil acesso, visando destacar quem apresenta o melhor custo-benefício. Por fim, é desenvolvido um cenário para a cidade de Brasília, na qual é considerada a melhor tecnologia de geração de energia entre as elencadas neste trabalho.

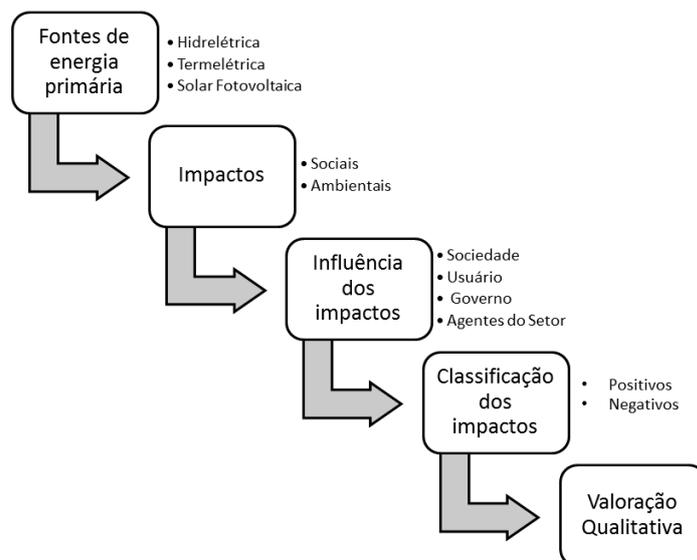


Figura 3: Diagrama para a avaliação dos impactos socioambientais referente às fontes energéticas indicadas.

A forma de comparação adotada pode apresentar um grau de subjetividade visto que não se leva em conta os impactos causados por uma forma específica de cada fonte, mas da generalidade das mesmas.

## 4. RESULTADOS

Com o intuito de representar de forma clara e integrada a grandeza das interferências ambientais decorrentes dos empreendimentos hidrelétricos, termelétricos a gás natural e solar fotovoltaicos, foram relacionados os principais impactos socioambientais de cada um dos três tipos de fontes energéticas estudadas.

### 4.1 Hidrelétricas

Em geral as hidrelétricas apresentam baixa emissão de gases de efeito estufa, principalmente quando comparadas com as termelétricas. É uma fonte renovável visto que tem como combustível água. Em uma usina hidrelétrica, a geração de energia não implica no consumo da água, deixando o recurso hídrico livre para utilizar após a geração e, por esse motivo, é considerado uma fonte economicamente competitiva, com baixo custo de operação. A flexibilidade operativa é outro benefício da hidreletricidade.

As hidrelétricas apresentam desvantagens tanto na fase de construção como na de operação. Durante a etapa de construção, os solos ficam expostos com a retirada da vegetação nativa, intensificando os processos erosivos. A implantação de barragens e construção de reservatórios de água ocasionam interrupção do curso da água, alterando o regime hídrico. Impactos socioeconômicos ocorrem desde a fase de planejamento, gerando expectativas na população e interferindo em locais de patrimônio cultural e social; os povos e comunidades indígenas e tradicionais são mais sensíveis aos impactos decorrentes da construção de uma usina (EPE, 2016).

A Tab. 2 apresenta os impactos socioambientais, tanto positivos como negativos, por diversos pontos de vista, eles são retratados de uma forma geral dado que impactos específicos causados por uma usina particular decorrem do tipo de usina, da situação do sítio e do gerenciamento aplicado pela empresa responsável.

Tabela 2: Principais vantagens e desvantagens na geração hidrelétrica.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE (2016).

| Hidrelétrica     |  |  |
|------------------|--|--|
|                  | Vantagens  | Desvantagens   |
| Governo          | Fonte economicamente competitiva, com baixo custo de operação quando comparada a outras fontes; Fonte hídrica renovável. | Incremento populacional que possibilita a sobrecarga nos equipamentos e serviços públicos  |
| Usuário          | Produz grandes montantes de energia  | Comprometimento da qualidade da água;  |
| Agentes do setor | Flexibilidade operativa;   | A retirada da vegetação nativa para formar o reservatório e para a abertura de vias de acesso;   |
|                  | Maturidade tecnológica;  |  |
|                  | Aumento da segurança energética de todo sistema.   | Necessidade de licenciamento ambiental.  |
| Sociedade        | Baixa emissão de gases de efeito estufa;   | A obra pode interferir em locais com elementos do patrimônio natural, cultural, histórico, arqueológico, paleontológico, paisagístico e espeleológico; |
|                  | Reservatórios de acumulação regularizam a vazão dos rios;  |  |
|                  | Desenvolvimento social e econômico obtido a partir do avanço da indústria hidrelétrica;                                  | A obra pode atingir diretamente cidades, vilas, distritos, afetando moradias, benfeitorias, equipamentos sociais.                                      |
|                  | Geração de empregos temporários;   |  |
|                  | Dinamização da economia local.   |  |

## 4.2 Termelétricas

Os empreendimentos termelétricos liberam grande quantidade de poluentes na atmosfera, mesmo aqueles que utilizam combustíveis renováveis como a biomassa. A utilização do gás natural atende a múltiplos setores como o energético, o de edificações, o de transportes, e também os que são associados ao uso não energético, dessa forma os impactos da produção não são restritos à geração termelétrica.

Usinas termelétricas ocupam áreas relativamente pequenas, possuem uma flexibilidade operacional e locacional. Como utilizam tecnologias de resfriamento, pode haver consumo significativo de água. Uma das maiores preocupações em relação aos impactos da geração termelétrica a gás natural estão associados à emissão de poluentes na atmosfera que geram acidificação da água das chuvas e efeito estufa.

Os impactos mais expressivos e típicos da fonte de geração termelétrica a gás natural estão classificados na Tab. 3, na qual apresenta as vantagens e desvantagens da usina termelétrica de forma geral.

Tabela 3: Principais vantagens e desvantagens na geração termelétrica a gás natural.

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE (2016).

| Termelétrica – Gás Natural |   |  |
|----------------------------|---|--|
|                            | Vantagens   | Desvantagens   |
| Governo                    | Aumento na arrecadação de tributos e incremento na economia local                                 | Custo final elevado quando comparado às outras fontes energéticas.   |
| Usuário                    | Independente de variações climáticas.   | Interferência na infraestrutura local.   |
| Agentes do setor           | Flexibilidade Operacional.  | Interferência na fauna e flora;  |
| Sociedade                  | Flexibilidade Locacional, o que permite um baixo custo inerente a extensas linhas de transmissão. | Consumo expressivo da água decorrente da tecnologia usada para resfriamento;   |
|                            |   | Emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), que geram alteração da qualidade do ar, efeitos na saúde da população local e acidificação da água das chuvas; |
|                            |   | Gera emissão de gases de efeito estufa, principalmente o CO <sub>2</sub> .   |

## 4.3 Energia Solar

A necessidade de inserção de fontes renováveis na matriz elétrica possibilita o uso do Sol como fonte direta de eletricidade, para essa utilidade evidencia o uso de três tecnologias: fotovoltaica, heliotérmica e sistemas isolados da rede elétrica. A fotovoltaica é a que vem conquistando a maioria dos mercados nesses últimos anos. Apresenta-se na forma de geração centralizada – grandes centrais conectadas a linhas de transmissão – ou de geração distribuída – produção de energia nas proximidades do local onde será utilizada.

Sistemas fotovoltaicos apresentam impactos socioambientais de baixa escala. Possuem flexibilidade locacional e permite a aceleração da eletrificação em locais distantes com difícil acesso. Os impactos da cadeia produtiva são mais expressivos, pois a produção do silício metalúrgico gera impactos desde a fase de extração até a fase de fabricação (EPE, 2016). Durante a fase de purificação do silício ocorre a liberação de gases tóxicos e de efeito estufa na atmosfera. Há a possibilidade de contaminação da água pelo descarte inadequado das baterias de chumbo-ácido, mais utilizadas em sistemas isolados, e a geração de resíduos tóxicos.

A Tab. 4 resume as principais vantagens e desvantagens de projetos de geração fotovoltaica.

Tabela 4: Principais vantagens e desvantagens de usinas fotovoltaicas.  
 Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE (2016).

| Solar Fotovoltaica |  |   |
|--------------------|--|---|
|                    | Vantagens  | Desvantagens  |
| Governo            | Incremento na economia local;  | Alto custo de instalação (geração centralizada).  |
| Usuário            | Geração descentralizada que permite a aceleração da eletrificação em regiões isoladas e de difícil acesso; | Alto custo de instalação (geração descentralizada).   |
| Agentes do setor   | Alta flexibilidade locacional da instalação;   | Alteração da paisagem e do uso do solo;   |
|                    | Baixa interferência na fauna e flora   |   |
| Sociedade          | Geração de empregos temporários e permanentes.   | Geração de expectativas em torno do empreendimento;   |
|                    |  | Possibilidade de emissão de gases de efeito estufa e de SO <sub>2</sub> , riscos de acidentes e danos ambientais devido à utilização de produtos químicos corrosivos, manuseamento de substâncias explosivas e gases tóxicos, geração de resíduos tóxicos. Decorrente do silício (matéria prima do painéis fotovoltaicos) |

Analisando as tabelas 2, 3 e 4 pode-se fazer uma comparação entre os impactos e seus efeitos de acordo com diferentes perspectivas. Os impactos relatados são classificados de acordo com a influência que eles exercem sobre cada grupo e recebem um valor específico. Como os impactos que afetam a sociedade conseguem alcançar um grupo maior, ele receberá peso dois e os demais receberão peso um.

Atividades hidrelétricas e termelétricas apresentam interferências negativas na fauna e na flora. É comum em projetos hidrelétricos, com a construção de barragens, a interrupção do curso d'água, além de alterar o regime hídrico; a retirada da vegetação nativa na etapa de construção desenvolve os processos erosivos e comprometem a qualidade da água. A geração termelétrica acarreta elevada emissão de poluentes atmosféricos, no caso de termelétricas a gás natural destacam-se as emissões de óxidos de nitrogênio e gases de efeito estufa, que geram alterações na qualidade do ar, efeitos na saúde da população, acidificação da água das chuvas e mudanças climáticas globais. A fonte solar fotovoltaica também é responsável por impactos negativos ao meio ambiente, principalmente na cadeia de produção e no descarte dos módulos fotovoltaicos, porém é a que menos agride a natureza, quando comparado com as demais fontes analisadas no presente estudo.

Empreendimentos hidrelétricos possuem baixo custo de operação quando comparado com outros empreendimentos, estimula a economia com proposta de capacitação e contratação de mão de obra no local onde será construída a usina, e também promove o incremento das receitas locais (Fig. 4). A indústria hidrelétrica é considerada tecnologicamente madura por não sofrer grandes mudanças no seu processo produtivo e por possuir muitos estudos na área de impactos ambientais. Um dos principais benefícios das usinas a gás natural é a independência das variações climáticas, o que traz confiabilidade ao sistema, também possuem a vantagem de flexibilidade locacional permitindo a

implantação em áreas próximas aos centros de carga (Fig. 5). A geração de energia elétrica a partir do aproveitamento solar, com tecnologia fotovoltaica, apresenta impactos ambientais de baixa magnitude quando comparado com outras fontes o que oferece uma grande vantagem à essa fonte, além de apresentar baixa interferência na fauna e flora.



Figura 4: Ponderação dos impactos decorrentes de empreendimentos hidrelétricos.

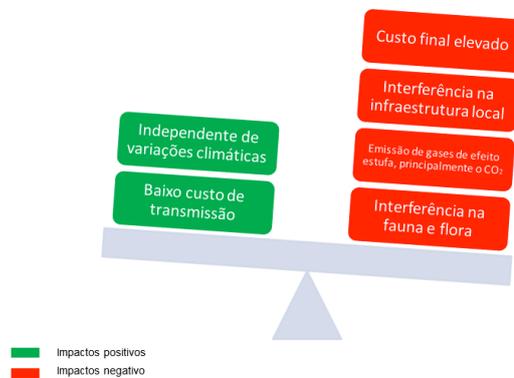


Figura 5: Ponderação dos impactos decorrentes de empreendimentos termelétricos a gás natural.

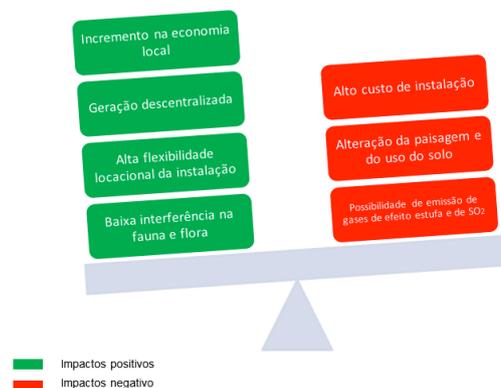


Figura 6: Ponderação dos impactos decorrentes de empreendimentos de solar fotovoltaica.

A fonte solar fotovoltaica chama atenção por possuir vantagens que sobressaem suas desvantagens, tornando assim a mais recomendada para investimentos que visam atender aspectos socioambientais (Fig. 6). A maioria dos impactos da fonte solar fotovoltaica está relacionada com a produção de células fotovoltaicas, isso pode ser considerado uma vantagem, pois se a fábrica se adequar aos padrões ambientais, há possibilidade de controlar esse impacto.

A ação de valorar um recurso ambiental baseia-se em quantificar o bem-estar das pessoas decorrente das mudanças na quantidade e na qualidade dos bens ambientais. Porém existe certa dificuldade para encontrar preços de mercado que retratam os valores conferidos aos recursos ambientais. Tendo em vista essa limitação, restringe a análise dos custos ambientais derivados de empreendimentos energéticos abordados nesse estudo, termelétrica, hidrelétrica, solar fotovoltaica, de forma qualitativa.

A partir dos impactos ambientais consequente de hidrelétricas priorizam-se para valoração os impactos da alteração do fluxo de reservatórios sobre as atividades do setor primário, impactos de construção de acesso sobre as florestas e impactos das emissões de gases de efeito estufa sobre a mudança do clima.

Em relação aos impactos ambientais de termelétricas à gás natural pode-se priorizar os impactos das fases de construção e operação sobre a saúde ocupacional, impactos das emissões de gases de estufa e das emissões atmosféricas da fase de geração de energia sobre a sociedade e os ecossistemas terrestres. Já os impactos ambientais causados por usina solar fotovoltaica têm como prioridade os impactos do ciclo de vida das células fotovoltaicas, impactos pela alteração do ecossistema.

Em longo prazo, os impactos causados por fontes hidrelétricas e termelétricas são mais relevantes, pois influenciam de forma negativa e permanente, já que são empreendimentos de grande porte. Empreendimentos que usam o sol como combustível utilizando a tecnologia fotovoltaica são recentes e utilizam novas tecnologias possibilitando o desenvolvimento de células fotovoltaicas formadas de elementos químicos com baixo impacto ambiental.

## 5. CENÁRIO

Em presença das políticas climáticas em debate e das metas de implantação de energias renováveis, e considerando que as negociações da COP 21 levaram para 2020 as reduções de emissões de gases de efeito estufa, foi simulado o cenário, apresentado a seguir, de desenvolvimento da energia solar fotovoltaica para cidade de Brasília.

Brasília apresenta um índice elevado de incidência solar e nível de precipitação mediano, possibilitando assim o crescimento de empreendimentos solar fotovoltaico. Até 2017, 36 MW da potência nacional é proveniente do sol, usando a tecnologia fotovoltaica, desse total 820 kW está instalado no Distrito Federal. Para 2030, essa produção corresponderá cerca de 133.000 unidades consumidoras no DF (EPE, 2015) (Tab. 5).

Tabela 5: Dados de geração solar fotovoltaica no Brasil e DF de 2017 a 2030.

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ANEEL e EPE.

|  | Ano  | MW Brasil | MW DF | Unidade Consumidora - DF acumulado | Adição por ano |        |
|--|------|-----------|-------|------------------------------------|----------------|--------|
|  | 2017 | 0         | 35,8  | 0,82                               | 580            | -      |
|  | 2018 | 1         | 369   | 8,48                               | 5.969          | 5.390  |
|  | 2019 | 2         | 751   | 17,26                              | 12.156         | 6.187  |
|  | 2020 | 3         | 1.182 | 27,18                              | 19.140         | 6.984  |
|  | 2021 | 4         | 1.662 | 38,23                              | 26.921         | 7.781  |
|  | 2022 | 5         | 2.192 | 50,41                              | 35.499         | 8.578  |
|  | 2023 | 6         | 2.770 | 63,72                              | 44.874         | 9.375  |
|  | 2024 | 7         | 3.398 | 78,16                              | 55.046         | 10.172 |
|  | 2025 | 8         | 4.076 | 93,74                              | 66.015         | 10.969 |
|  | 2026 | 9         | 4.802 | 110,45                             | 77.781         | 11.766 |
|  | 2027 | 10        | 5.578 | 128,29                             | 90.345         | 12.563 |
|  | 2028 | 11        | 6.403 | 147,26                             | 103.705        | 13.361 |
|  | 2029 | 12        | 7.277 | 167,37                             | 117.863        | 14.158 |
|  | 2030 | 13        | 8.200 | 188,60                             | 132.817        | 14.955 |

A demanda por energia utilizando esse tipo de fonte energética no centro-oeste do país tende a crescer de forma exponencial nos próximos 20 anos. Em 2050, o Brasil deve possuir 37 GW proveniente de geração distribuída sendo que 1% desse montante será proveniente da energia produzida no DF. Foi feita uma interpolação para simular o crescimento anual (Fig. 7).

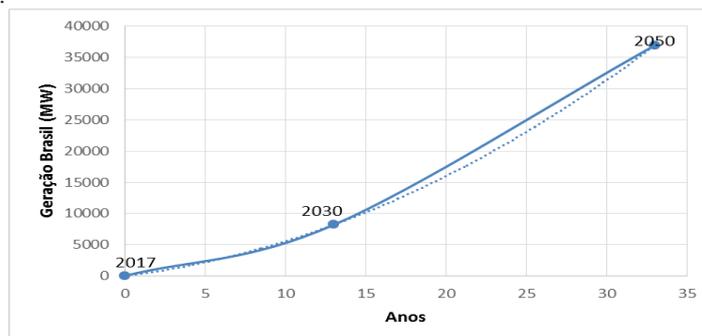


Figura 7: Dados de geração solar fotovoltaica (MW) no Brasil de 2017 a 2050.

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ANEEL e EPE.

## 6. CONCLUSÃO

Para análise comparativa dos três tipos de fontes de energia apresentados nesse estudo, levou-se em consideração os impactos provocados pela implantação e operação das usinas e suas consequências sobre os parâmetros de qualidade de vida da população existente e futura. Tais decorrências são a interferência na fauna, na flora e na atmosfera, a influência na economia, tanto local como nacional, e o impacto social.

Analisando as tabelas 2, 3 e 4 observa-se que as fontes hídricas e termelétricas apresentam um alto impacto negativo na fauna e na flora necessitando de elaboradas medidas de mitigação, porém a fonte solar fotovoltaica possui uma vantagem nesse aspecto porque oferece baixa interferência no meio biótico.

A fonte termelétrica possui elevado custo final, já os empreendimentos hidrelétricos apresentam baixo custo operacional. Os impactos sociais decorrentes de fontes energéticas são bem similares, mas grandes empreendimentos, como as hidrelétricas e as térmicas, tendem a proporcionar impactos negativos elevados, podendo atingir diretamente as comunidades. Pode-se concluir que projetos de geração fotovoltaica são os que possuem menores impactos socioambientais negativos e exprimem qualidades elevadas.

Por esses motivos, o estudo indica ser vantajoso, considerando as óticas de Governo, Usuário, Agentes do Setor e Sociedade, investir na fonte solar fotovoltaica, pois apresenta, a longo prazo, um custo-benefício adequado já que seus impactos ambientais negativos estão relacionados em suma com a produção e descarte de células fotovoltaicas que atualmente já possuem novas tecnologias menos agressivas.

## 7. REFERÊNCIAS

- Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), 2008. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Brasília.
- Agência Nacional De Energia Elétrica (ANEEL), 2017. Banco de Informações de Geração: BIG.
- Bruckner, T., Bashmakov, I.A., Mulugetta, Y., Chum, H., de la Vega Navarro, A., Edmonds, J., Faaij, A., Fungtammasan, B., Garg, A., Hertwich, E., Honnery, D., Infield, D., Kainuma, M., Khennas, S., Kim, S., Nimir, H. B., Riahi, K., Strachan, N., Wiser, R., Zhang, X., 2014. Energy Systems, Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.
- Cremonese, F. E.; Cremonese, P. A.; Feroldi, M.; Camargo, M. P. de; Klajn, F. F.; Teiden, A, 2014. Avaliação de impacto ambiental: metodologias aplicadas no Brasil, Revista Monografias Ambientais - REMOA v.13, n.5, p.3821-3830.
- Desideri, U., Proietti, S., Zepparelli, F., Sdringola, P., Bini, S, 2012. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. Applied Energy 97, p.930–943. Department of Industrial Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italy.
- Empresa de pesquisa energética (EPE), 2015. Nota Técnica DEA XX/15 Cenário Econômico 2050, Rio de Janeiro.
- Guerra, S. M. Carvalho, A. V. de, 1995. Um paralelo entre os impactos das usinas hidrelétricas e termoelétricas. Revista de Administração de Empresas, v.35, no. 4, p. 83-90, São Paulo.
- International Energy Agency (IEA), 2014. Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy, OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA), 2016. Next-Generation Wind and Solar Power From cost to value, OECD/IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA), 2016. Key World energy statistics, OECD/IEA, Paris.
- Inatomi, T. A. H.; Udaeta, M. E. M, 2007. Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos, USP, São Paulo.
- Tolmasquim, M. T, 2016. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), Rio de Janeiro.
- Tolmasquim, M.T, 2016. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), Rio de Janeiro.

### COMPARATIVE ASSESSMENT OF PHOTOVOLTAIC, HYDROELECTRIC AND THERMOELECTRIC SOURCES CONSIDERING ENVIRONMENTAL COSTS

**Abstract.** *Currently, the Brazilian electricity sector is basically supplied by thermoelectric and hydroelectric sources, but these sources cause relevant environmental impacts. The expected increase in energy consumption for the next few years is likely to lead to the exhaustion of these resources, where the energy crisis will be aggravated by the scarcity of water resources, and the need to introduce new sources, preferably renewables, to avoid this possible situation of crisis. In this context, this research intends to make a comparative analysis of solar photovoltaic energy with the main sources of electric energy already used in Brazil, hydroelectric and thermoelectric, considering environmental and economic dimensions, aiming at the diversification of the energy matrix. As a specific objective, it is hoped to identify the advantages and disadvantages of photovoltaic solar, hydroelectric and thermoelectric energies, comparing environmental impacts and qualitatively weighting them, thus allowing to check which option, from a more comprehensive perspective, is more attractive.*

**Key words:** *Hydroelectric, Thermoelectric, Photovoltaic Solar.*