

# ANÁLISE DAS MODALIDADES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA SOLAR PARA UM CONSUMO SUSTENTÁVEL E EFICIENTE

Gustavo Luis Mazetto – g217500@dac.unicamp.br

Leonardo de Almeida Gozzi – l178389@dac.unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Divisão de Engenharia Ambiental

Tália Simões dos Santos Ximenes – talia@unicamp.br

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Divisão de Engenharia de Telecomunicações

**Resumo.** O artigo analisa diferentes modalidades de geração distribuída de energia solar no Brasil, com foco na sustentabilidade e eficiência energética. São investigados quatro modelos: Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras, Geração Compartilhada, Autoconsumo Remoto e Autoconsumo Local. O estudo avalia a viabilidade econômica e os impactos socioambientais de cada modalidade, destacando aspectos como custo de instalação, retorno sobre o investimento (payback), e custo nivelado de energia (LCOE). O objetivo é mostrar as modalidades e conseguir analisá-las conforme os dados reais apresentados. Estes dados são específicos dos estudos de casos de cada modalidade apresentada e, com isso, podem variar com base em diferentes condições regionais e econômicas. A pesquisa conclui que a modalidade de Autoconsumo Remoto apresenta o melhor equilíbrio entre custo-benefício e impacto ambiental, enquanto as outras modalidades oferecem alternativas eficazes dependendo do perfil de consumo e contexto regional.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída, Energia Solar, Sustentabilidade

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, há um aumento na procura por uma energia mais sustentável e limpa, o que estimula o surgimento de novas tecnologias e a criação de novos modelos de produção de energia. Entre as tecnologias emergentes, destaca-se a geração distribuída de energia solar. Ela representa uma opção que possibilita a geração de eletricidade de forma descentralizada, utilizando a radiação solar. Este estudo aborda quatro tipos de geração distribuída, de acordo com a legislação brasileira, com o objetivo de compreender e examinar qual delas tem o maior potencial para auxiliar na promoção de um consumo energético mais sustentável e eficiente no país. São elas: Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC), Geração Compartilhada, Autoconsumo Remoto e Autoconsumo Local.

A matriz energética do Brasil é predominantemente composta por fontes renováveis, com a energia solar fotovoltaica se destacando como uma de suas principais forças. Informações de 2023 indicam que ela representou 11,6% do total da matriz elétrica do país, possuindo uma capacidade instalada superior a 25 gigawatts (GW). A diminuição dos custos de instalação aliada a políticas governamentais de estímulo, fazem da energia fotovoltaica uma das principais oportunidades para utilização no Brasil (Canal Energia, 2023; Neves, 2023). Por conta da localização geográfica, a capacidade energética dessa geração é uma das mais elevadas do mundo em território nacional. No que diz respeito à radiação solar média diária, o país tem quase o dobro em relação aos países europeus, com 4,5 a 6 kWh/m<sup>2</sup>, em comparação com 2,5 a 3,5 kWh/m<sup>2</sup>. (EPE, 2023).

Conforme Pereira et al (2017), as diversidades do Brasil possuem diferentes possibilidades de produção de energia elétrica através da geração fotovoltaica. A pesquisa demonstrou que o Brasil possui níveis bastante altos de irradiação solar, porém com uma variação mensal significativamente menor do que outros países como Alemanha, Espanha, Itália, Portugal e França. A região do Nordeste demonstrou o maior potencial para a produção de energia, alcançando uma média anual superior a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, graças à sua elevada incidência solar. Em seguida, as regiões Centro-Oeste e Sudeste exibem médias de irradiação variando entre 5,0 e 5,5 kWh/m<sup>2</sup>/dia, respectivamente. Em última análise, as regiões Norte e Sul exibem os valores mais baixos de irradiação anual, variando entre 4,0 e 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia no Sul, e 4,5 a 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/dia no Norte. Essas informações destacam a variedade e a capacidade da energia solar no Brasil, podendo indicar caminhos mais precisos e relevantes para o crescimento da geração fotovoltaica (EPE, 2023).

Em termos de sustentabilidade, a energia solar fotovoltaica é a que emite menos CO<sub>2</sub> na atmosfera, cerca de 20 a 60 gCO<sub>2</sub>/kWh (IEA, 2023). A maior parte da emissão está ligada à produção e instalação de painéis solares, enquanto durante a produção de energia a emissão é praticamente inexistente. Além disso, ao considerar a transição energética, os efeitos são predominantemente benéficos, considerando que a maior parte da matriz elétrica global provém de combustíveis fósseis.

Acerca das quatro modalidades de geração distribuída salienta-se:

### 1. Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC):

Essa modalidade se aplica a condomínios, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, onde a energia gerada por um sistema solar instalado em área comum é distribuída entre as unidades consumidoras.

Esse tipo de geração permite que seus usuários aproveitem melhor o espaço disponível de áreas comuns para a instalação dos módulos fotovoltaicos (ENEL, 2017).

2. Geração Compartilhada:

Modelo no qual consumidores compartilham a mesma energia gerada por uma única usina solar. Para locais onde não se tem espaço ou recursos suficientes para instalar seu próprio sistema de geração, essa alternativa se apresenta útil, fazendo com que seus usuários formem uma cooperativa/consórcio, dividindo seus custos de instalação e operação da usina em si (Moura Netto e Urbanetz Junior, 2022).

3. Autoconsumo Remoto:

O autoconsumo remoto se caracteriza pela geração de energia solar onde um grupo instala uma usina solar em um local diferente daquele onde o consumo ocorre. A energia gerada é injetada na rede de distribuição e os créditos são abatidos das contas de energia dos consumidores participantes. Esse modelo é ideal para aqueles que possuem propriedades, desde que a matrícula do imóvel esteja cadastrada ao mesmo CPF/CNPJ do proprietário, em locais distintos, permitindo uma melhor utilização de áreas com maior potencial solar. (Rodrigues et al., 2021).

4. Autoconsumo Local:

Modalidade mais direta de geração distribuída, onde a energia gerada por um sistema solar é consumida no mesmo local em que é produzida. Os excedentes de energia podem ser injetados na rede, gerando créditos que podem ser utilizados em períodos de menor produção solar. Essa modalidade é bastante comum em residências e pequenas empresas (ANEEL, 2023).

Este trabalho busca analisar em profundidade cada uma destas modalidades de geração distribuída de energia solar, identificando suas características e análises econômicas, vantagens e desvantagens, além dos efeitos socioambientais tais como a diminuição das emissões de gás carbônico e as vantagens para a comunidade. A proposta central é apresentar as quatro modalidades de geração distribuída com cálculos para entender qual destas modalidades tem o maior potencial para impulsionar o consumo energético no Brasil de maneira mais sustentável e eficiente, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a independência energética. Destaca-se que o objetivo principal não é realizar uma comparação direta entre as quatro modalidades, pois elas correspondem a potências distintas, mas sim apresentar os cálculos necessários e os fatores a serem considerados na tomada de decisão quanto aos custos e às emissões de gás carbônico. Além disso, por meio dessa análise, espera-se fornecer subsídios para políticas públicas e iniciativas privadas que promovam a adoção massiva da energia solar no país, alinhando-se aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente, a partir da seleção dos quatro modelos de geração distribuída, foi feita uma avaliação econômica baseada nos custos de instalação, levando em conta o investimento inicial para cada modelo, além dos gastos com manutenção e operação. O potencial de diminuição de custos foi considerado devido à escala de cada usina e seus incentivos e subsídios correspondentes. Para cada modelo, estudou-se o custo da eletricidade, considerando as tarifas vigentes. Por outro lado, a análise econômica inclui o cálculo do retorno sobre o investimento (*payback*), que estabelece o período de retorno do investimento inicial, o custo nivelado de energia (LCOE), que representa o custo de geração de energia durante a vida útil da usina no modelo atual, e, finalmente, a diminuição na conta de energia elétrica dos consumidores. Os dados das modalidades de Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras e Geração Compartilhada foram obtidos em sites disponíveis e os dados das modalidades Autoconsumo Remoto e Autoconsumo Local foram disponibilizados pelo próprio dono dos estabelecimentos. Após a realização de análises fundamentais, foi identificado o modelo que proporciona os melhores resultados em termos de viabilidade econômica, social e ambiental.

O preço por kWh da energia elétrica é determinado por cada tipo de geração. Este critério compara o efeito financeiro no uso de energia, levando em conta as tarifas vigentes, almejando avaliar a viabilidade financeira para os consumidores finais. É necessário levar em conta o custo da eletricidade e as tarifas, pois o propósito do estudo é determinar qual tipo de geração distribuída pode resultar em maior economia. Comparando os custos de energia e as reduções nas contas, é possível determinar qual sistema é mais eficaz financeiramente. A Eq. 1 apresenta como determinar o custo da energia.

$$\text{Custo da Energia} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Energia produzida ao longo da vida útil}} \quad (1)$$

O *payback* simples representa o período necessário para que o investimento inicial em um sistema de produção de energia solar seja pago pelas economias obtidas nas faturas de energia. Trata-se de um fator essencial na avaliação da viabilidade financeira de cada modalidade. A escolha do *payback* simples foi devido à sua simplicidade e rapidez na

análise do tempo de retorno do investimento, sendo adequado para este projeto de curto prazo com fluxos de caixa constantes e baixo risco financeiro. No ambiente de trabalho, este critério possibilita avaliar o período necessário para cada modelo de geração recuperar o investimento, ajudando na seleção do modelo mais atrativo para investidores e consumidores preocupados com o retorno financeiro (Antoniolli et al, 2018). No contexto atual brasileiro, é importante considerar também o impacto da regulação sobre a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), que afeta diretamente a viabilidade financeira dos sistemas de geração distribuída. Recentemente, a inclusão de cobranças de TUSD para consumidores que utilizam geração distribuída vem sendo discutida, o que pode alterar significativamente o tempo de retorno do investimento e o custo nivelado de energia (Melo, 2023). A Eq. 2 demonstra o cálculo do *payback*.

$$Payback = \frac{Investimento\ inicial}{Economia\ anual + Custo\ anual\ TUSD} \quad (2)$$

O custo nivelado de energia (LCOE) é o custo total de produção de energia durante a vida útil do sistema, dividido pelo total de energia produzida. Com este critério avalia-se a competitividade de cada forma de geração distribuída de energia solar, auxiliando na tomada de uma decisão consciente sobre qual sistema é mais eficaz a longo prazo (Pawel, 2014). A Eq. 3 mostra o cálculo do LCOE.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{I_t + M_t + O_t + C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

onde:  $I_t$  = Investimento inicial no ano  $t$ ;  $M_t$  = Custos de manutenção no ano  $t$ ;  $O_t$  = Outros custos operacionais no ano  $t$ ;  $E_t$  = Energia produzida no ano  $t$ ;  $C_t$  = Custo da TUSD anual, proporcional ao uso da rede;  $r$  = Taxa de desconto e  $T$  = Vida útil do sistema.

Para realizar o cálculo de custo anual da TUSD, basta multiplicar o consumo anual (em kWh) pela tarifa TUSD (em R\$/kWh) correspondente, representada pela equação Eq. 4 (Loiola, 2024).

$$Gasto\ anual\ TUSD = Consumo\ anual \times Tarifa \quad (4)$$

Como não foi disponibilizado o consumo anual de cada caso, o custo anual da TUSD foi desconsiderado no cálculo final, uma vez que, proporcionalmente, não afeta a análise comparativa. Ademais, as unidades de geração distribuída (GD) analisadas nos estudos de caso foram instaladas em um período anterior à aplicação da tarifa, outro motivo por ter sido desconsiderada nos cálculos apresentados neste artigo.

Então, o cálculo do LCOE pode ser simplificado, resultando na Eq. 5.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{I_t + O_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

onde:  $I_t$  = Investimento inicial no ano  $t$ ;  $O_t$  = Custos de manutenção e operação no ano  $t$ ;  $E_t$  = Energia produzida no ano  $t$ ;  $r$  = Taxa de desconto e  $T$  = Vida útil do sistema.

Outro objetivo deste trabalho é a análise socioambiental. Os efeitos socioambientais analisam as repercussões sociais e ecológicas ligadas à implementação de sistemas de geração distribuída, tais como a diminuição das emissões de carbono e as vantagens para a comunidade, bem como os obstáculos de administração e funcionamento. Este critério é relevante para o propósito da pesquisa, já que a energia solar é frequentemente divulgada como uma opção sustentável. Analisar os efeitos socioambientais possibilita compreender como cada prática auxilia na diminuição de emissões e na sustentabilidade, o que é crucial para os consumidores que procuram não somente vantagens econômicas, mas também benefícios para o meio ambiente.

Outra forma de analisar os impactos ambientais é utilizando a calculadora de carbono. Cada kWh de energia solar evita a emissão de aproximadamente 0,5 kg de CO<sub>2</sub>, que seria gerado por fontes convencionais (Woltz, 2024). Para mensurar esse impacto, pode-se utilizar uma calculadora, que converte o CO<sub>2</sub> evitado em "árvores salvas", considerando que uma árvore adulta absorve cerca de 22 kg de CO<sub>2</sub> por ano (EPA, 2024). Dessa forma, é possível compreender que a quantidade de árvores salvas que pode ser descrita pela Eq. 6.

$$Árvores\ Salvas = \frac{kg\ de\ CO_2\ evitado}{22\ kg\ de\ CO_2} \quad (6)$$

Portanto, para as análises, foi realizada a comparação e discussão dos quatro tipos de geração distribuída de energia solar: Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC), Geração Compartilhada, Autoconsumo Remoto e Autoconsumo Local. A comparação é baseada nos seguintes critérios: investimento inicial e custos de manutenção, custo de energia elétrica e tarifas atuais, análise de retorno sobre o investimento (*Payback*), custo nivelado de energia (LCOE), pontos positivos e negativos e impactos socioambientais.

A Figura 1 ilustra o fluxograma da metodologia utilizada.

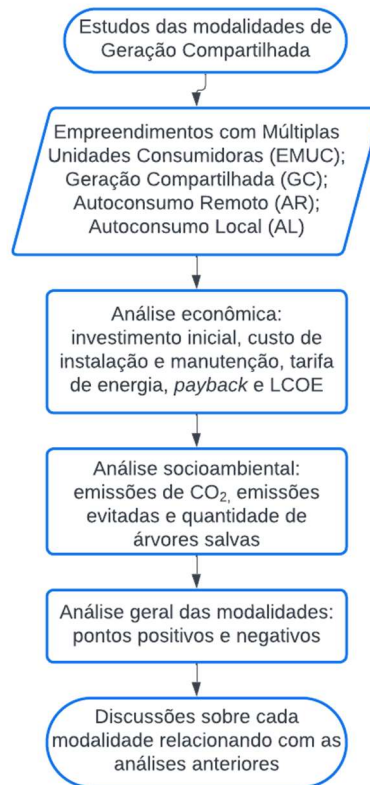


Figura 1: Fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Estudo de Caso para Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC)

O estudo de caso utilizado para a modalidade de EMUC foi o Condomínio Spazio Parthenon localizado em Belo Horizonte – MG (19°S, 44°O) (INFRA ROI, 2018). O sistema fotovoltaico utilizado é de 440 kWp com um investimento inicial de R\$ 1.500.000,00, ou seja, R\$ 3.409,09 por kWp. A produção anual de energia é de 633.600 kWh, considerando 120kWh/mês por apartamento (440 ao todo) e 12 meses. A tarifa de energia é de R\$ 0,53/kWh (CEMIG, 2024). Há custos de manutenção anual de 1,5% do investimento inicial, com custo médio segundo a Enel Brasil de R\$ 22.500,00 anuais. Este valor de manutenção é razoável tendo em vista um custo de R\$35,50 por MWh gerado, ou seja, adequado, inclusive mais eficiente que usinas menores.

Utilizando a Eq. 1, calculou-se o custo da energia para este estudo de caso:

$$\text{Custo da energia (EMUC)} = \frac{\text{R\$ } 1.500.000,00}{633.600 \text{ kWh}} = \text{R\$ } 2,37/\text{kWh}$$

A redução anual é de 633.600 kWh x R\$ 0,53/ kWh = R\$ 335.808,00. O *payback* foi calculado com a Eq. 2:

$$\text{Payback (EMUC)} = \frac{\text{R\$ } 1.500.000,00}{\text{R\$ } 335.808,00} = 4,47 \text{ anos}$$

Já o custo nivelado de energia foi calculado pela Eq. 5, com uma vida útil de 25 anos e uma taxa de desconto de 6%:

$$\text{LCOE}_{EMUC} = \frac{1.500.000,00 + \sum_{t=1}^{25} \frac{22.500,00}{(1 + 0,06)^t}}{633.600 \times \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1 + 0,06)^t}} = \frac{1.787.617,50}{8.099.308,80} \approx \text{R\$ } 0,22/\text{kWh}$$

### 3.2 Estudo de Caso para Geração Compartilhada (GC)

O estudo de caso utilizado para a modalidade de GC foi a Usinas Brasil Solar (BRS) localizada em Bebedouro – SP (20°S, 48°O). O sistema fotovoltaico utilizado é de 3.875 kWp com um investimento inicial de R\$ 18.000.000,00, ou seja, R\$ 4.645,00 por kWp. A produção anual de energia é de aproximadamente 7.500.000 kWh, isto é, 630.000 kWh por mês, e a tarifa de energia é de R\$ 0,78/kWh (CPFL Energia, 2024). Há custos de manutenção anual de 1,5% do investimento inicial, com custo médio segundo a Enel Brasil de R\$ 270.000,00 anuais. Este valor de manutenção é razoável tendo em vista um custo de R\$36,00 por MWh gerado, ou seja, é um valor factível e esperado para o porte do sistema.

Utilizando a Eq. 1, calculou-se o custo da energia para este estudo de caso de geração compartilhada (GC):

$$\text{Custo da energia (GC)} = \frac{R\$ 18.000.000,00}{7.500.000 \text{ kWh}} = R\$ 2,40/kWh$$

A redução anual é de 7.500.000 kWh x R\$ 0,78/ kWh = R\$ 5.850.000,00. O *payback* foi calculado com a Eq. 2:

$$\text{Payback (GC)} = \frac{R\$ 18.000.000,00}{R\$ 5.850.000,00} = 3,08 \text{ anos}$$

Já o custo nivelado de energia foi calculado pela Eq. 5, com uma vida útil de 25 anos e uma taxa de desconto de 6%:

$$LCOE_{GC} = \frac{18.000.000,00 + \sum_{t=1}^{25} \frac{270.000,00}{(1 + 0,06)^t}}{7.500.000 \times \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1 + 0,06)^t}} = \frac{21.451.410,00}{95.872.500} \approx R\$0,22/kWh$$

### 3.3 Estudo de Caso para Autoconsumo Remoto (AR)

O estudo de caso utilizado para a modalidade de AR foi o Colégio Jandyra localizado em Limeira – SP (22°S, 47°O). O sistema fotovoltaico utilizado é de 93,5 kWp com um investimento inicial de R\$ 255.289,16, ou seja, R\$ 2.730,37 por kWp. A produção anual de energia é de 134.640 kWh e a tarifa de energia é de R\$ 0,75/kWh (Elektro, 2024). Há custos de manutenção anual para limpeza dos painéis solares de R\$ 1.000,00 fixos. Este valor de manutenção é muito baixo tendo em vista um custo de R\$7,43 por MWh gerado, mas justificável, já que provavelmente envolve só limpeza anual.

Utilizando a Eq. 1, calculou-se o custo da energia para este estudo de caso de autoconsumo remoto (AR):

$$\text{Custo da energia (AR)} = \frac{R\$ 255.289,16}{134.640 \text{ kWh}} = R\$ 1,90/kWh$$

A redução anual é de 134.640 kWh x R\$ 0,75/ kWh = R\$ 100.980,00. O *payback* foi calculado com a Eq. 2:

$$\text{Payback (AR)} = \frac{R\$ 255.289,16}{R\$ 100.980,00} = 2,5 \text{ anos}$$

Já o custo nivelado de energia foi calculado pela Eq. 5, com uma vida útil de 25 anos e uma taxa de desconto de 6%:

$$LCOE_{AR} = \frac{255.289,16 + \sum_{t=1}^{25} \frac{1.000,00}{(1 + 0,06)^t}}{134.640 \times \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1 + 0,06)^t}} = \frac{268.072,16}{1.721.103,12} \approx R\$0,16/kWh$$

### 3.4 Estudo de Caso para Autoconsumo Local (AL)

O estudo de caso utilizado para a modalidade de AL foi o Colégio Jandyrinha localizado em Limeira – SP (22°S, 47°O). O sistema fotovoltaico utilizado é de 49,02 kWp com um investimento inicial de R\$ 150.369,88, ou seja, R\$ 3.067,52 por kWp. A produção anual de energia é de 70.588,80 kWh e a tarifa de energia é de R\$ 0,75/kWh (Elektro, 2024). Há custos de manutenção anual para limpeza dos painéis solares de R\$ 1.000,00 fixos. Este valor de manutenção

é baixo tendo em vista um custo de R\$14,17 por MWh gerado, ou seja, ainda baixo, mas um pouco mais condizente com o tamanho.

Utilizando a Eq. 1, calculou-se o custo da energia para este estudo de caso de autoconsumo local (AL):

$$\text{Custo da energia (AL)} = \frac{R\$ 150.369,88}{70.588,80 \text{ kWh}} = R\$ 2,13/\text{kWh}$$

A redução anual é de 70.588,80 kWh x R\$ 0,75/ kWh = R\$ 52.941,60. O *payback* foi calculado com a Eq. 2:

$$\text{Payback (AL)} = \frac{R\$ 150.369,88}{R\$ 52.941,60} = 2,8 \text{ anos}$$

Já o custo nivelado de energia foi calculado pela Eq. 5, com uma vida útil de 25 anos e uma taxa de desconto de 6%:

$$LCOE_{AL} = \frac{150.369,88 + \sum_{t=1}^{25} \frac{1.000,00}{(1 + 0,06)^t}}{70.588,80 \times \sum_{t=1}^{25} \frac{1}{(1 + 0,06)^t}} = \frac{163.152,88}{902.337,653} \approx R\$0,18/\text{kWh}$$

### 3.5 Comparação dos Tipos de Geração Distribuída Estudados

Os resultados obtidos das quatro modalidades foram organizados na Tab. 1.

Tabela 1 – Resultados dos estudos de casos.

CRITÉRIO	EMUC: SPAZIO PARTHENON	GC: Usinas Brasil Solar (BRS)	AR: Colégio Jandyra	AL: Colégio Jandyrinha
Investimento Inicial	R\$ 3.409,10/kWp	R\$ 4.645,00/kWp	R\$ 2.730,37/kWp	R\$ 3.067,52 /kWp
Custos de Manutenção	R\$ 22.500,00 anuais	R\$ 270.000,00 anuais	R\$ 1.000,00 anuais	R\$ 1.000,00 anuais
Custo de Energia Elétrica	R\$2,37/kWh	R\$2,40/kWh	R\$1,90/kWh	R\$2,13/kWh
<i>Payback</i>	4,47 anos	3,08 anos	2,5 anos	2,8 anos
LCOE	R\$ 0,22/kWh	R\$ 0,22/kWh	R\$ 0,16/kWh	R\$ 0,18/kWh

Primeiramente, percebeu-se a relação financeira entre o Investimento Inicial (R\$/kWp) e o *Payback* (anos). Essa relação é capaz de fornecer informações essenciais para a análise da viabilidade econômica e dessa forma, construiu-se o gráfico apresentado na Figura 2, onde, de maneira visual, é possível realizar a análise.

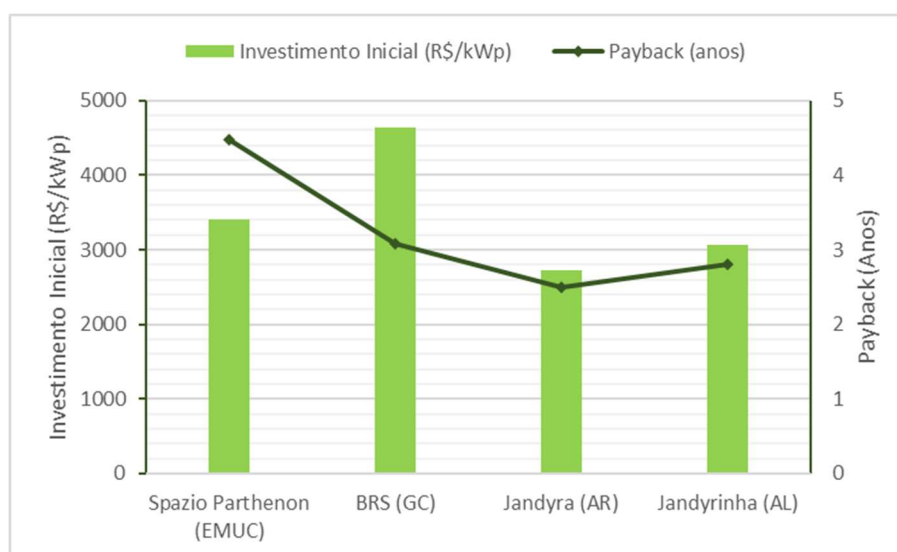


Figura 2: Relação entre investimento inicial e *payback*.

Embora a BRS (modalidade de GC) apresente um custo de investimento inicial alto comparado aos das outras modalidades, o modelo de geração compartilhada ainda assim é capaz de apresentar um *payback* acelerado. Essa informação mostra que existe um retorno alto em um menor período, tornando o modelo viável economicamente para os

investidores. Além disso, também por conta de seu rápido retorno financeiro, comprova-se que a geração compartilhada gera reduz barreiras financeiras, permitindo a acessibilidade à múltiplos pequenos consumidores, que, em caso de compartilhamento dos custos de investimento, podem ser beneficiados sem necessidade de realizar altos investimentos e ainda consumir energia de fontes renováveis, já que o modelo permite a formação de uma sociedade para investidores.

Por outro lado, a modalidade de EMUC, representada pela unidade Spazio Pantheon, é a que apresentou o menor custo-benefício dentre as modalidades presentes na geração distribuída. O alto valor de *payback* implica que o retorno financeiro, a partir do que se foi gasto para instalação do sistema, seja menos eficiente, deixando-o como o menos atrativo do ponto de vista financeiro.

Por fim, as modalidades de Autoconsumo Local e Autoconsumo Remoto das unidades Jandyrinha e Jandyra, respectivamente, apresentaram valores semelhantes de *payback*, 2,8 e 2,5 anos, sendo possível considerá-las como modalidades viáveis economicamente por terem um *payback* mais rápido.

### 3.6 Impactos Socioambientais

#### 3.6.1 Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC)

O estudo de caso desta modalidade foi no Condomínio Spazio Parthenon e os pontos positivos e negativos relacionados aos impactos socioambientais são:

- **Pontos positivos:** Redução significativa de emissões de gases de efeito estufa; promoção de energia sustentável em áreas urbanas e valorização dos imóveis.
- **Pontos negativos:** Complexidade na gestão do rateio de energia e desentendimentos entre condôminos poderão ocorrer.
- **Emissões evitadas:**  $633.600\text{kWh} \times 0,6\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 380.160\text{kg}$  de CO<sub>2</sub> evitados por ano.
- **Equivalente em árvores:**  $380.160\text{kg CO}_2/22\text{kg CO}_2/\text{árvore/ano} \approx 17.280$  árvores salvas por ano.

#### 3.6.2 Geração Compartilhada

O estudo de caso foi na Usinas Brasil Solar e os pontos positivos e negativos relacionados aos impactos socioambientais de acordo com a análise desta modalidade são:

- **Pontos positivos:** Inclusão de consumidores sem espaço para painéis solares; incentivo à cooperação comunitária, e redução de emissões de gases de efeito estufa.
- **Pontos negativos:** Complexidade na gestão e necessidade de consenso entre participantes.
- **Emissões evitadas:**  $7.500.000\text{kWh} \times 0,6\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 4.500.000\text{kg}$  de CO<sub>2</sub> evitados por ano.
- **Equivalente em árvores:**  $4.500.000\text{kg CO}_2/22\text{kg CO}_2/\text{árvore/ano} \approx 204.545$  árvores salvas por ano.

#### 3.6.3 Autoconsumo Remoto

Para esta modalidade o estudo de caso foi feito com os dados do Colégio Jandyra e os pontos positivos e negativos destacados aos impactos socioambientais são:

- **Pontos positivos:** Maximiza o uso de energia solar em várias propriedades, contribuindo para a redução de emissões e maior independência energética.
- **Pontos negativos:** Requer investimentos iniciais maiores e sistemas de distribuição mais complexos.
- **Emissões evitadas:**  $134.640\text{kWh} \times 0,6\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 80.784\text{kg}$  de CO<sub>2</sub> evitados por ano.
- **Equivalente em árvores:**  $80.784\text{kg CO}_2/22\text{kg CO}_2/\text{árvore/ano} \approx 3.672$  árvores salvas por ano.

#### 3.6.4 Autoconsumo Local

O caso estudado para esta modalidade foi o Colégio Jandyrinha e os pontos positivos e negativos em relação aos impactos socioambientais são:

- **Pontos positivos:** Simplicidade na instalação e gestão, e adequação para pequenas propriedades com baixa demanda energética.
- **Pontos negativos:** Menor escala de impacto ambiental positivo e limitação ao consumo da unidade.
- **Emissões evitadas:**  $70.588,8\text{kWh} \times 0,6\text{kg CO}_2/\text{kWh} = 42.353,28\text{kg}$  de CO<sub>2</sub> evitados por ano.
- **Equivalente em árvores:**  $42.353,28\text{kg CO}_2/22\text{kg CO}_2/\text{árvore/ano} \approx 1.925$  árvores salvas por ano.

### 3.6.5. Emissão de Gás Carbônico Evitada

É notável a alta discrepância entre os valores encontrados para cada modalidade no que se refere à análise socioambiental e, por isso, deve-se tomar conta novamente do investimento inicial de cada projeto, pois assim é possível comparar os dados em suas devidas proporções. Dessa forma, buscou-se compreender o quanto o investimento inicial representa da emissão de gás carbônico evitada por meio dos seguintes cálculos.

- **EMUC: SPAZIO PARTHENON:**  $380.160 \text{ kg} / \text{R\$ } 1.500.000,00 = 0,25 \text{ kg/R\$}$
- **GC: Usinas Brasil Solar (BRS):**  $4.500.000 \text{ kg} / \text{R\$ } 18.000.000,00 = 0,25 \text{ kg/R\$}$
- **AR: Colégio Jandyra:**  $80.784 \text{ kg} / \text{R\$ } 255.289,16 = 0,32 \text{ kg/R\$}$
- **AL: Colégio Jandyrinha:**  $42.353,28 \text{ kg} / \text{R\$ } 150.369,88 = 0,28 \text{ kg/R\$}$

O gráfico apresentado na Figura 3 mostra a relação entre o investimento inicial e a emissão de gás carbônico evitada em cada estudo de caso.

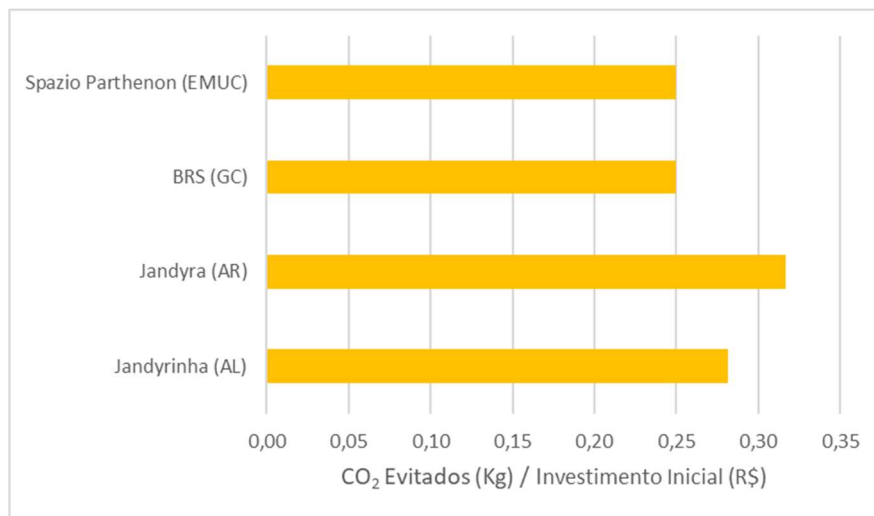


Figura 3: Quantidade de CO<sub>2</sub> evitada em relação ao investimento inicial para cada estudo de caso.

O gráfico da Figura 3 evidencia uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> evitada para as modalidades que apresentam um menor investimento inicial. Nota-se que o Autoconsumo Remoto e o Autoconsumo Local apresentaram uma maior eficiência na emissão de CO<sub>2</sub> para cada real investido, sendo que no primeiro caso, pode ser justificado pelo modelo proporcionar uma maior flexibilidade no uso na energia, este capaz de atender às demandas do consumidor gerador. Em seguida, o Autoconsumo Local apresentou a segunda maior eficiência por ser diretamente impactada com a demanda do consumidor, já que, neste modelo, não é possível aproveitar toda energia gerada.

Apesar dos números apresentados nos estudos de caso, ressalta-se que quanto maior o investimento inicial e maior o tamanho do projeto (potência instalada), uma maior quantidade de gás carbônico é consequentemente evitada. Importante então fazer uma relação percentual entre elas. Observa-se que, com apenas 1,42% do investimento destinado à geração compartilhada (quando comparado ao autoconsumo remoto), é possível evitar 28% mais de CO<sub>2</sub>. Essa análise evidencia a maior eficiência dos projetos de autoconsumo remoto e local, ao mesmo tempo em que revela a ineficiência do estudo de caso para a geração compartilhada, bem como para a EMUC.

## 4. CONCLUSÕES

Este estudo analisou quatro formas de geração distribuída de energia solar - Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC), Geração Compartilhada, Autoconsumo Remoto e Autoconsumo Local - com a finalidade de determinar qual delas possui o maior potencial para estimular o consumo de energia sustentável no Brasil. A comparação entre essas formas de consumo revelou que o modelo de Autoconsumo Remoto se sobressai como o mais equilibrado em termos de custo-benefício e impacto ambiental, seguido pelo Autoconsumo Local.

No que diz respeito à eficiência econômica e ambiental, o Autoconsumo Remoto apresentou um custo uniforme de energia (LCOE) de R\$ 0,16/kWh, aliado a um período de retorno do investimento (*payback*) de 2,5 anos, destacando-se como uma alternativa viável para proprietários com várias propriedades em regiões com elevada incidência solar. No que diz respeito à diminuição das emissões de gás carbônico, essa estratégia demonstrou uma elevada taxa de eficácia, prevenindo a liberação de 80.784 kg de CO<sub>2</sub> anualmente, o que corresponde à preservação de aproximadamente 3.672 árvores no mesmo intervalo de tempo.



A modalidade de Autoconsumo Local também mostrou resultados notáveis, com um LCOE de R\$ 0,18/kWh e um período de retorno de 2,8 anos. Esta abordagem, além de conveniente para pequenas propriedades, possibilita uma significativa economia de energia e impacto ambiental. No que diz respeito à redução de emissões, o Autoconsumo Local contribui para a redução de aproximadamente 42.353 kg de CO<sub>2</sub> anualmente, o que equivale à conservação de 1.925 árvores, proporcionando uma opção econômica e sustentável para pequenos consumidores. Por outro lado, a Geração Compartilhada se mostrou uma opção inclusiva, permitindo que consumidores sem espaço físico próprio possam ter acesso à energia solar. Apesar do LCOE mais elevado de R\$ 0,22/kWh, o retorno de investimento de 3,08 anos e as emissões evitadas de 4.500.000 kg de CO<sub>2</sub> por ano, equivalente a 204.545 árvores, destacam esta opção como uma solução de impacto para cooperativas e comunidades.

Finalmente, o Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras (EMUC), apropriados para condomínios e zonas urbanas, apresentaram o retorno financeiro mais baixo (com um *payback* de 4,47 anos e um LCOE de R\$ 0,22/kWh). Contudo, possuem um potencial significativo para fomentar a sustentabilidade em regiões urbanas densamente povoadas, prevenindo a liberação de 380.160 kg de CO<sub>2</sub>, o que corresponde à conservação de 17.280 árvores por ano.

Os dados apresentados são específicos para os estudos de caso selecionados e podem variar com base em diferentes condições regionais, tecnológicas e econômicas. Embora a análise forneça uma visão aprofundada das quatro modalidades de geração distribuída, é possível que outros exemplos fora dos estudos de caso analisados possam apresentar melhores desempenhos financeiros ou operacionais.

Outro ponto a ser levado em consideração é que a alta radiação nas três cidades assegura uma geração robusta. Diferenças de 2 a 4% na irradiação implicam proporcional diferença na produção anual, ou seja, pequena em relação à magnitude dos projetos. Portanto, a variação climática não altera significativamente o desempenho comparativo dos sistemas. Então, a análise de irradiação confirma que nenhuma cidade apresenta condição limitante, e todas oferecem ótimas condições solares.

Chega-se à conclusão de que o Autoconsumo Remoto tem o maior potencial para auxiliar no consumo sustentável e na independência energética do Brasil, seguido pelo Autoconsumo Local. Ambos oferecem uma elevada eficiência na redução de gás carbônico evitado por investimento inicial. Com base nesses dados, espera-se que esta avaliação auxilie na formulação de políticas públicas e ações privadas que incentivem a utilização de energia solar, contribuindo de maneira significativa para as metas de sustentabilidade e transição energética nacionais.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem as instituições utilizadas como estudos de caso neste trabalho, que nos forneceram dados para análise e discussões dos resultados, principalmente aos Colégios Jandyra e Jandyrinha, que em nome do Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade nos forneceu todos os dados de investimentos, contas de energia de antes e depois da implementação do sistema de energia solar fotovoltaico.

### **REFERÊNCIAS**

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). 2023. Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil. Brasília.
- Antoniolli, A. F.; Almeida, J. S.; Moscardini Júnior, E. F.; Rüther, R. 2018. Análise de um Sistema Fotovoltaico Compartilhado Aplicado à Edificação de Unidades Consumidoras Residenciais e Comerciais. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, [S. l.], 2018. DOI: 10.59627/cbens.2018.495. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/495>. Acesso em: 15 out. 2024.
- Canal Energia. 2023. Energia solar atinge 25 GW de potência instalada. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53238020/energia-solar-atinge-25-gw-de-potencia-instalada>. Acesso em: 27 out. 2024.
- CEMIG. Tarifas de Energia da CEMIG. Disponível em: <https://www.cemig.com.br>. Acesso em: 4 out. 2024.
- CPFL Energia. Tarifas de Energia. Disponível em: <https://www.cpfl.com.br>. Acesso em: 4 out. 2024.
- Elektro, Neoenergia. Tarifas e Consumo. Disponível em: <https://www.neoenergia.com>. Acesso em: 4 out. 2024.
- ENEL. 2017. Cartilha de geração distribuída para grandes clientes. Disponível em: [https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/corporativo-e-governo/gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADda/131\\_0717\\_enel\\_btl\\_grandes\\_clientes\\_cartilha\\_05.pdf](https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/corporativo-e-governo/gera%C3%A7%C3%A3o-distribu%C3%ADda/131_0717_enel_btl_grandes_clientes_cartilha_05.pdf). Acesso em: 3 out. 2024.
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2024. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>. Acesso em: 15 out. 2024.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética). 2023. Balanço Energético Nacional 2023. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 8 mar. 2024.
- IEA (International Energy Agency). 2023. World Energy Outlook 2023. Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 12 abr. 2024.
- INFRA ROI. 2018. Retorno de Investimento em Infraestrutura. Spazio Parthenon. Disponível em: <https://infraroi.com.br/tag/spazio-parthenon/>. Acesso em: 3 out. 2024.

- Loiola, V. Entenda mais sobre o consumo TUSD na conta de luz. Portal Solar. Disponível em: [https://www.portalsolar.com.br/consumo-tusd?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.portalsolar.com.br/consumo-tusd?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 19 dez. 2024.
- Melo, F. Taxação deixará energia solar mais cara em 2024. O Povo, 26 dez. 2023. Disponível em: [https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2023/12/26/taxacao-deixara-energia-solar-mais-cara-em-2024-entenda.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.opovo.com.br/noticias/economia/2023/12/26/taxacao-deixara-energia-solar-mais-cara-em-2024-entenda.html?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 19 dez. 2024.
- Moura Netto, A.; Urbanetz Junior, J. 2022. Análise da Geração Compartilhada de Energia Elétrica no Brasil. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, [S. l.], p. 1–10, 2022. DOI: 10.59627/cbens.2022.1203. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1203>. Acesso em: 15 out. 2024.
- Neves, L. 2023. BRS lança nova usina solar de geração compartilhada com 3 MW na área da CPFL Paulista. Disponível em: <http://www.pv-magazine-brasil.com/2023/06/06/brs-lanca-nova-usina-solar-de-geracao-compartilhada-com-3-mw-na-area-da-cpfl-paulista/>. Acesso em: 3 out. 2024.
- Pawel, I. 2014. The cost of storage - how to calculate the levelized cost of stored energy (LCOE) and applications to renewable energy generation. Energy Procedia, v. 46, p. 68-77.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. J. L.; Rütther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos: INPE.
- Rodrigues, R. T., et al. 2021. Estudo sobre o autoconsumo remoto de energia solar: oportunidades e desafios. Journal of Solar Energy Research, vol. 13, no. 3, pp. 123-139.
- Woltz. 2024. Energia solar já evitou emissão de 50 toneladas de CO<sub>2</sub> no Brasil. Disponível em: <https://blog.woltz.com.br/2024/08/02/energia-solar-ja-evitou-emissao-de-50-toneladas-de-co2-no-brasil/>. Acesso em: 10 out. 2024.

## ANALYSIS OF DISTRIBUTED SOLAR ENERGY GENERATION METHODS FOR SUSTAINABLE AND EFFICIENT CONSUMPTION

**Abstract.** *The article analyzes different modalities of distributed solar energy generation in Brazil, focusing on sustainability and energy efficiency. Four models are investigated: Multi-Consumer Ventures, Shared Generation, Remote Self-Consumption, and Local Self-Consumption. The study assesses the economic viability and socio-environmental impacts of each modality, highlighting aspects such as installation costs, return on investment (payback), and levelized cost of energy (LCOE). The goal is to showcase the modalities and be able to analyze them based on the real data presented. This data is specific to the case studies of each modality presented and, therefore, can vary based on different regional and economic conditions. The research concludes that the Remote Self-Consumption modality presents the best balance between cost-effectiveness and environmental impact, while the other modalities offer effective alternatives depending on consumption profiles and regional contexts.*

**Keywords:** *Distributed generation, Solar energy, Sustainability*