

Estimativa de redução de emissão de CO₂ pela inserção de UFV para cidades isoladas na Amazônia

Aline Santana Gallina*, **Lucas Matheus de Sousa Lima***
Isabelle Santiago*, **Gustavo Moreira Oliveira de Castro***, **Klaus Carvalho Ludwig***

**eAmazônia – Energia Sustentável e Inovação, Rio Branco, Acre, Brasil
(Tel: 68 999007011; e-mails: aline.gallina@eamazonia.org. lucas.matheus@eamazonia.org
isabelle@eamazonia.org. gustavo@eamazonia.org. klaus.ludwig@eamazonia.org)*

Abstract: Most of the cities isolated from the national interconnected electrical grid are located in the Brazilian Northern Region, and are mainly supplied by thermal power generation, despite representing the main contribution of the electricity sector to greenhouse gas emissions. The isolation occurs mainly because of environmental issues and financial constraints. In Acre, six thermal units supply three isolated cities, with a total installed capacity of 48,34 MW. Due to the potential for renewable energy generation and the high solar irradiance at the sites, the potential for photovoltaic generation in the municipalities of Cruzeiro do Sul, Feijó and Tarauacá was studied considering their respective load curves and solarimetric data of the region, which were provided by stations close to the locations, using the RadiaSol 2 software. Generation systems were proposed for each municipality considering 400W panels, varying the photovoltaic penetration rate with 100%, 75% and 50%. Computer simulations were used to estimate the environmental benefits of the possible replacement of the energy source was estimated based on the reduction of CO₂ emissions calculated with the bottom-up method. The quantity and total area of the panels and the cost of implementation were also estimated. The carbon dioxide emissions of the photovoltaic power generation were much lower than those of thermal power generation with diesel fuel. They decreased between 94% and 47% compared to thermal power generation in the three cities. Despite the high costs photovoltaic plants, the investment in hybrid power generation systems is justified by the environmental benefits.

Resumo: Na região Norte do Brasil encontra-se a maior parte dos municípios eletricamente isolados do SIN, sendo abastecidos principalmente por usinas termoeletricas, apesar de representarem a principal contribuição do setor elétrico para emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE). A falta de conexão acontece principalmente por questões ambientais e inviabilidade econômica. No Acre, seis usinas termoeletricas abastecem três municípios isolados, somando 48,34 MW de potência instalada. Devido ao potencial de produção de energia renovável e à alta irradiação solar nas localidades, estudou-se o potencial de geração fotovoltaica nos municípios de Cruzeiro do Sul, Feijó e Tarauacá, considerando suas respectivas curvas de carga e dados solarimétricos da região, que foram providos por estações próximas às localidades e utilização do software RadiaSol 2. Foram propostos sistemas de geração para cada município, considerando painéis de 400W, variando a taxa de penetração fotovoltaica em 100%, 75% e 50%, e através de simulações computacionais foi estimado o benefício ambiental da possível troca da fonte de energia, com base na redução de emissão de CO₂ calculada por meio da metodologia bottom-up. Além disso, foram estimados a quantidade e área total dos painéis e custo de implantação. A emissão de gás carbônico da geração fotovoltaica foi muito inferior à emissão da geração térmica a diesel, correspondendo a uma diminuição variando de 93,96% a 47,00%, em relação a situação com geração termoeletrica para os três municípios. Apesar do alto custo das usinas fotovoltaicas é justificado o investimento em sistemas de geração híbridos em função do benefício ambiental.

Keywords: Isolated systems, Photovoltaic plants, Thermal plants, CO₂ emissions, Amazônia.

Palavras-chaves: Sistemas isolados, Usinas fotovoltaicas, Usinas térmicas, Emissão de CO₂, Amazônia.

1. INTRODUÇÃO

A Região Norte do Brasil, preenchida quase em sua totalidade por áreas da floresta amazônica, é a região onde encontram-se a maior parte dos municípios isolados do sistema elétrico nacional. A falta de conexão ocorre em grande parte por questões ambientais e pela inviabilidade econômica inerente a pequenas cargas em locais de difícil

acesso, além do início tardio da construção de grandes usinas na região (Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2021b; Lorenzo, sem data).

Em 1972, a geração de energia elétrica na região norte era exclusivamente realizada por usinas térmicas a diesel e óleo combustível. Neste mesmo ano, a potência gerada na região

correspondia a menos de 2% da potência gerada no Brasil (FGV CPDOC, 2021).

Ainda na década de 1970, a Eletrobrás inseriu no Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 a diversificação nas fontes de geração, incluindo os potenciais hidráulicos da Bacia Amazônica. Por este motivo, a implantação de diversas usinas hidrelétricas na região foi fortalecida dando início às fontes de energia renováveis na Amazônia e à interligação Norte-Nordeste concluída em 1981 (Seger, Mercedes e Rico, 2015; FGV CPDOC, 2021).

Em 1982, foi iniciada a construção da Usina de Samuel, no estado de Rondônia, sendo a primeira a abastecer a capital acreana, Rio Branco. Já em 2008, iniciou-se a construção das Hidrelétricas Santo Antônio e Jirau, também nos rios rondonienses. Esses empreendimentos contribuíram para a integração de Rondônia e também do Acre ao Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2009 (Castilho, 2019; FGV CPDOC, 2021).

Atualmente, Rondônia tem seus principais municípios integrados ao SIN, mas o mesmo não ocorre para o Acre, onde o segundo município mais populoso, Cruzeiro do Sul, faz parte do sistema isolado, sendo sua carga suprida pela Geração Termelétrica (GT). Assim como Cruzeiro do Sul, os municípios de Tarauacá e Feijó, também não serão integrados nos próximos cinco anos, visto que fazem parte do Leilão de Sistemas Isolados/2021, sendo a integração uma realidade apenas para os municípios próximos à capital (IBGE, 2010; Castilho, 2019; Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2021).

Segundo o Sistema de Informações de Geração da Aneel (SIGA), seis usinas termoelétricas (UTES) abastecem os três municípios acreanos e, juntas, somam 48.340,00 kW de potência instalada. De forma geral, as UTES são as instalações mais utilizadas para suprir os sistemas isolados no Brasil, ainda que representem a principal contribuição do setor elétrico na emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), e que tem seus efeitos agravados por conta do desmatamento e das queimadas na região que já contribuem para redução da capacidade de retirar dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera. Deste modo, a utilização de combustíveis fósseis na geração de energia é um agravante (Rocha, 2012; SCG, 2021).

Além disso, a área apresenta um potencial de produção de energia limpa e renovável, devido à alta irradiação solar, possibilitando a geração fotovoltaica, o que pode reduzir a utilização de UTES e assim mitigar a emissão de GEE (BNDES, 2013; Chávez-rodríguez et al., 2013; Pivetta, 2020).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo propor sistemas de Geração Fotovoltaica (GF) para as cidades de Cruzeiro do Sul, Feijó e Tarauacá, considerando suas curvas de carga e os dados solarimétricos da região. Além de estimar, por meio de simulações computacionais, o benefício ambiental de uma possível substituição com base na redução da emissão de CO₂ ocasionada pela troca na fonte de energia.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o intuito de realizar a transferência de energia por todo o Brasil foi criado o SIN, composto por usinas hidrelétricas instaladas nas cinco regiões do país, usinas eólicas e usinas térmicas (Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2021a).

No entanto, há comunidades de pequeno e médio porte que não estão conectadas ao SIN, a estas localidades é dada a designação de 'sistemas isolados', estando a maioria destas localizada na região Norte e no estado do Mato Grosso. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (2021b) são ao todo 212 localidades, que são constituídas também de área rural, denominadas regiões remotas. Isso ocorre devido às dificuldades logísticas, ocasionadas pela extensão geográfica, mas também pelos obstáculos naturais (Brasil, 2010; Wilke, 2015).

Aproximadamente, 3 milhões de pessoas são atendidas por sistemas isolados, a faixa de carga de consumo se inicia em vilas com geração de 48 kW à capital Boa Vista, com geração superior a 660 MW. A geração de energia destas cidades é majoritariamente constituída de pequenas e médias usinas termelétricas movidas a óleo diesel (Ferrão, Tormam e Guedes, 2015; Cunha, Soares e Silva, 2018; Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019; SCG, 2021).

2.1 Geração Térmica

As usinas termelétricas são escolhidas para o abastecimento de sistemas isolados devido a simplicidade de operação e baixo custo de instalação, além da possibilidade de operação contínua e variação de cargas. No entanto, possuem um custo de operação relativamente alto, isso se deve, além do custo do próprio combustível, à dificuldade logística do transporte do óleo diesel para as localidades (Cunha, Soares e Silva, 2018; Pires da Ponte, 2019).

Além disso, outro ponto negativo da GT é a emissão de poluentes como o óxido de enxofre, conhecido por ocasionar problemas ambientais diversos, como a chuva ácida. Visto que, o combustível usado é o que apresenta maior teor de enxofre dentre os tipos de diesel comercializados no Brasil (Miranda, 2012; Viscondi, Silva e Cunha, 2016; Lawson e Pereira, 2017; Pires da Ponte, 2019).

Além da emissão de óxido de enxofre, uma das maiores preocupações acerca da utilização da GT, a partir da queima do diesel, é a produção de gases de efeito estufa. De acordo com Pires da Ponte (2019), o diesel é o segundo maior emissor de GEE entre os combustíveis fósseis. Assim, o sistema isolado pode emitir até 7,4 vezes mais GEE que os demais sistemas conectados ao SIN, utilizando como medida a tonelada de CO₂ equivalente por MWh (Lawson e Pereira, 2017).

2.2 Sistemas Fotovoltaicos na Região Amazônica

Uma das soluções alternativas para a substituição de usinas termelétricas movidas a diesel é a utilização de usinas

fotovoltaicas, devido ao seu impacto direto na redução de emissão de CO₂ na atmosfera, agregando valores econômicos, socioculturais e ambientais (Barbosa Filho et al., 2015).

O princípio básico do funcionamento da placa fotovoltaica é a criação de cargas negativas e positivas. Para a criação de cargas negativas, é adicionado Boro ao Silício, e para criar cargas positivas, é adicionado Fósforo, por um processo chamado dopagem. O silício, que se encontra carregado positivamente, é posto junto ao silício carregado negativamente, arranjo que permite que a célula reaja ao sol, produzindo energia elétrica através da colisão dos fótons solares com os átomos de silício, gerando deslocamento de elétrons e, conseqüentemente, corrente elétrica (Ribeiro, 2018).

O recurso necessário para geração de energia fotovoltaica, após a implantação das plantas de geração, é unicamente a luz solar. Neste sentido, a região Amazônica é caracterizada por altos índices de incidência solar, mas também de altas temperaturas, por estar localizada na zona tropical.

No entanto, segundo Junior et al. (2010), a Região Amazônica, mesmo para dias de céu encoberto, apresenta uma geração de 5kWh/m². A análise deste estudo se baseia no índice de radiação solar anual feita pelo projeto SWERA, no ano de 2005, onde foi demonstrado que a média de radiação solar global na Amazônia é de 5.0kWh/m² a 5.5kWh/m², o que é satisfatório para a utilização de sistemas fotovoltaicos.

Segundo o estudo levantado em 2013, para o XV Congresso de Brasileiro de Energia, a falta de incentivos fiscais juntos com baixa acessibilidade em sistemas isolados amazônicos, resultam na baixa utilização de GF. Porém, o mesmo estudo também aponta que essa seria uma alternativa promissora em sistemas híbridos, com unidades de 250-500 MW e unidades entre 500-2500 MW. Esses modelos viriam a ser lucrativos para a região e seriam uma forma de abastecimento elétrico para as regiões que não fazem parte do SIN. Como exemplo, tem-se o município de Oiapoque-AP, localizado no extremo norte do país, que possui um campo de geração de energia elétrica solar, que garante uma economia de 10% do diesel necessário para sua operação (Chávez-rodríguez et al., 2013; EPE, 2016).

Com a utilização da energia fotovoltaica, estima-se a redução de emissão de CO₂ anual é de 200 a 300 milhões de toneladas a nível mundial. Esse quantitativo é possível de estimar utilizando a metodologia bottom-up, que estima os valores de Dióxido de Carbono associados a uma determinada fonte de geração de energia. Esse parâmetro é estimado pela quantidade de CO₂ que é emitido de acordo com a geração de energia elétrica, variando conforme o tipo de fonte utilizada (Queiroz et al., 2019).

3. PROJETO DE USINAS FOTOVOLTAICAS

No estado acreano foram instaladas, em 2019, três estações solarimétricas, que disponibilizam os dados que foram utilizados neste trabalho. As estações estão localizadas nas cidades Cruzeiro do Sul, Rio Branco e Brasília. Dessas, são

obtidos dados de irradiação solar global, velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e precipitação (Ceeac, 2020).

Para projetar as usinas fotovoltaicas para cada uma das cidades de Cruzeiro do Sul, Feijó e Tarauacá, primeiramente foi utilizado a irradiância solar global (W/m²), que é medida pelas estações a cada 1 segundo. No entanto, o próprio equipamento realiza a média desses dados em 10 minutos. A partir desses dados obtém-se a irradiação solar global para plano normal diária (Wh/m².dia), pela divisão da irradiância média em 10 minutos por 6, e a soma destes valores em 24 horas (Freitas et al., 2020).

A partir deste mesmo princípio é definida a irradiação solar total para planos inclinados (I_t), como mostra a (1) (Moreira, 2017; Relva, 2020):

$$I_t = I_{bi} + I_{di} + I_r \quad (1)$$

Na qual I_{bi} é a irradiação direta em plano inclinado, já I_{di} é a irradiação difusa em plano inclinado e, por fim, I_r é a irradiação refletida no plano inclinado (Moreira, 2017; Relva, 2020). Para I_{bi} tem-se que:

$$I_{bi} = \int_{w_f}^{w_i} B \cos \theta \, dw \quad (2)$$

Onde:

- w_i e w_f são, respectivamente, ângulo inicial e final de cada hora;
- B é irradiância direta no plano normal;
- cos θ é o cosseno do ângulo de incidência;

Deste modo, necessita-se determinar cos θ, este resultado é dado por (Moreira, 2017; Relva, 2020):

$$\cos \theta = \sin \varnothing \cos \beta - \cos \varnothing \sin \beta \cos \gamma \sin \delta + \cos \varnothing \cos \beta + \sin \varnothing \sin \beta \cos \gamma \cos \delta \cos w + \cos \delta \sin \beta \sin w \quad (3)$$

Sendo que \varnothing simboliza a latitude do local de instalação da usina, β a inclinação do painel, γ o ângulo azimutal (positivo no sentido horário sul), δ a declinação solar e, w o ângulo horário (Moreira, 2017; Relva, 2020).

Sobre a inclinação do painel (β), a relação é direta com a latitude local. As três cidades citadas neste trabalho estão na faixa de latitude entre 7° e 8° Sul, deste modo, a inclinação ideal do painel é de 10° (Bosch, 2013; C. de L. S. IBGE, 2020).

Já a irradiação difusa em plano inclinado (I_{di}) é calculada a partir da (4) e a irradiação refletida (I_r) pela (5) (Relva, 2020).

$$I_{di} = I_d(1 + \cos \beta) \quad (4)$$

$$I_r = (I_d + I_b)\rho(1 - \cos \beta) \quad (5)$$

Tem-se que:

- I_d – irradiação difusa em uma hora;

- β – ângulo de inclinação;
- I_b – irradiação direta normal;
- ρ – o coeficiente de albedo.

O coeficiente de albedo diz a respeito da irradiação refletida, que depende da superfície analisada. Para grama, por exemplo, o coeficiente varia de 7% a 25%, para pastagem de 16% a 20% e para o solo nu de 10% a 20% (Relva, 2020).

Observa-se que os métodos matemáticos envolvem uma série de dados que devem ser adquiridos no local, ainda que este método não considere a temperatura média ambiente. Com o intuito de facilitar o projeto de usinas fotovoltaicas, foi criado o software Radiasol, pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para este trabalho, foi utilizado o Radiasol 2, que apresenta uma interface mais didática e possibilita a entrada manual de dados. Neste caso, foram inseridos os dados de irradiação solar global em plano normal e temperatura ambiente, obtidos pelas estações solarimétricas locais, além da inclinação do painel de 10°. A partir disso, o software é capaz de gerar a irradiação solar global em plano inclinado.

Após a obtenção da irradiação global em plano inclinado, calcula-se a média anual (H), em kWh/m².ano, para utilização na (6), que é a definição da energia gerada por uma usina fotovoltaica (E) (Relva, 2020).

$$E = ArH\eta \quad (6)$$

Nesta equação acima, tem-se a área total ocupada pelos painéis (A), em m², o rendimento do painel solar (r) e o coeficiente de desempenho (η) (Relva, 2020).

Para obter o valor de A é preciso calcular a distância entre as fileiras de painéis, que é dada por (7):

$$d = L(\cos\beta + \sin\beta\tan\alpha) \quad (7)$$

Onde é considerado o comprimento do painel (L), a inclinação do painel (β) e a altura solar (α).

O rendimento do painel é dado pelo fabricante, mas também pode ser calculado, visto que se trata da potência nominal do painel sobre sua área multiplicada pela irradiância padrão de teste. Por fim, o coeficiente de rendimento depende exclusivamente das perdas da usina, e tem um valor padrão de 0,75 (Relva, 2020).

4. REDUÇÃO DE EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO

Para realizar uma comparação da emissão de carbono de uma usina térmica a óleo diesel e uma usina solar fotovoltaica, é necessário conhecer o fator de emissão (FE), que relaciona a quantidade de CO₂ emitida em razão da geração de energia, medido em gCO₂/kWh. Deste modo, utiliza-se o método bottom-up, no qual a emissão é calculada considerando o consumo energético final, dado pela (8) (MIRANDA, 2012; Queiroz *et al.*, 2019):

$$ECO_2 = EP \times FE \quad (8)$$

Sendo ECO₂ a emissão de CO₂, em gCO₂, da usina e, EP a energia produzida pela usina em kWh.

As usinas fotovoltaicas também possuem seu fator de emissão, ainda que não emitam gás carbônico durante a produção de energia, visto que está presente na produção dos equipamentos e no ciclo de vida destes. Assim, o fator de emissão pode variar de 20 gCO₂/kWh à 50 gCO₂/kWh. Já o FE para usinas térmicas que utilizam óleo diesel é 828,96 gCO₂/kWh (Lourenço, 2016; Dantas, Apolônio e Junior, 2019; Queiroz *et al.*, 2019).

5. DISCUSSÕES E RESULTADOS

5.1 Cruzeiro do Sul

Localizada no Vale do Juruá, Cruzeiro do Sul é a segunda cidade mais populosa do Acre, com população estimada em mais de 89 mil habitantes. A curva de carga diária característica do ano de 2019 está apresentada na Fig. 1 (IBGE, 2020).

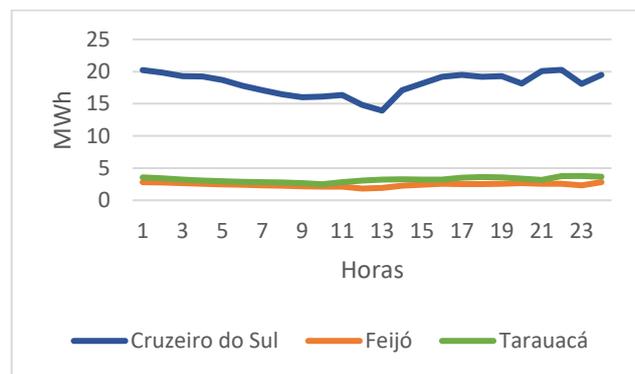


Fig. 1 Curva de Carga de Cruzeiro do Sul, Feijó e Tarauacá no ano de 2019.

A irradiância local, Fig. 2, é disponibilizada pela estação solarimétrica instalada no Campus Floresta (Cruzeiro do Sul), da Universidade Federal do Acre e os dados são apresentados em sua média mensal. A partir dos cálculos realizados foi obtido a irradiação global horizontal, Fig. 3. Estes dados foram utilizados no RadiaSol 2, o qual disponibilizou a irradiação global para plano inclinado, Fig. 4.

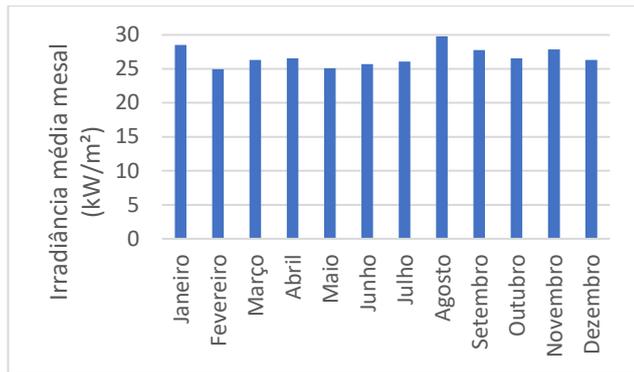


Fig. 2 Irradiância média mensal de Cruzeiro do Sul.

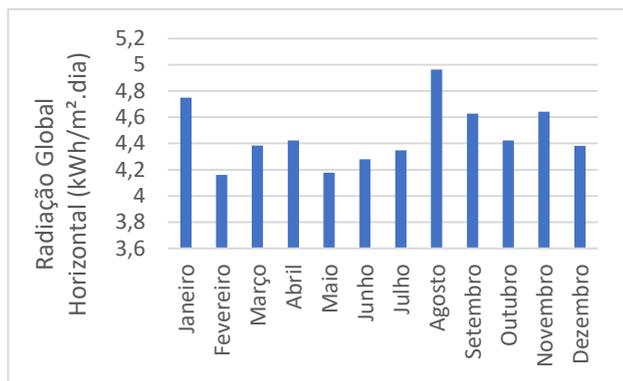


Fig. 3 Radiação Global Horizontal de Cruzeiro do Sul.

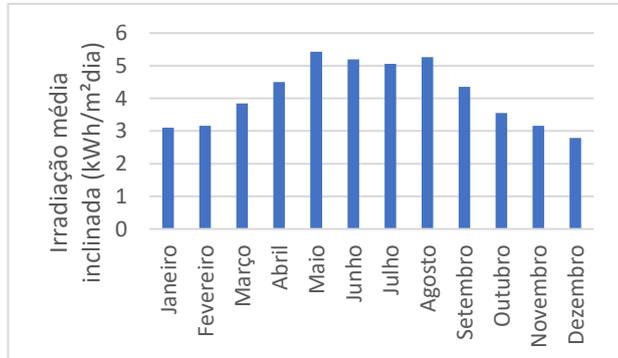


Fig. 4 Irradiação Inclinada de Cruzeiro do Sul.

A partir destes dados, obtém-se a radiação inclinada média anual, que no ano de 2019, em Cruzeiro do Sul foi de 4,1 kWh/m².dia, equivale a 1496,5 kWh/m².ano. Ainda, considerando um painel fotovoltaico de 400W, com rendimento de aproximadamente 0,1887 e sabendo que a energia gerada por ano na usina fotovoltaica deve atender a curva de carga desta cidade, tem-se que a área total de painéis é de aproximadamente 74 ha.

Já a emissão de CO₂ desta usina fotovoltaica, considerando o valor máximo do fator de emissão, será de 7.857 tCO₂ por ano, em torno de 16,6 vezes menor que a emissão de uma usina térmica a diesel que gere a mesma quantidade de energia. No entanto, seriam necessários em torno de 304 mil painéis, cerca de 100 MWp. Segundo EPE e MME (2018), o custo estimado para implantação de energia solar

fotovoltaica isolada é de 1.050 US\$ /kWh, para os anos de 2020 a 2029, deste modo o investimento para suprir 100% da carga de Cruzeiro do Sul seria em média US\$ 105.398.000,00 (cento e cinco milhões, trezentos e noventa e oito mil dólares).

No entanto, destaca-se que o investimento para possibilitar o suprimento de 100% da demanda de energia elétrica por GF, devido as características dessa geração, deve contempla ainda o sistema de armazenamento.

Ademais, considerando um sistema híbrido, no qual a fonte renovável seja responsável pela produção de 75% da energia consumida, estima-se que a emissão de gás carbônico seja de 38.458 tCO₂ para todo o sistema, na qual 84,8% correspondem a emissão da GT. A área ocupada pelos painéis é reduzida para 55 ha, sendo necessários 228 mil painéis de 400W. Além disso, o valor do investimento passa a ser de aproximadamente US\$ 79.000.000,00 (setenta e nove milhões de dólares).

Considerando que a geração de energia seja dividida igualmente entre as fontes, diminui-se a área de instalação da usina solar para 37 ha, a emissão de CO₂ desta passa a ser de aproximadamente 3.928,5 tCO₂, com a proporção de 16,6 vezes menor que a GT a diesel. O investimento necessário para geração de 50% da carga é de US\$ 53.000.000,00 (cinquenta e três milhões de dólares).

5.2 Feijó

Dentre as três cidades analisadas, Feijó tem a menor população, estimada em 32.884 habitantes. A curva de carga, em 2019, está na Fig. 1. Em uma simples comparação, observa-se que a carga de Feijó é quase 7 vezes menor que a carga de Cruzeiro do Sul.

Os dados de irradiância local foram inseridos no software RadiaSol 2, que apresentou o resultado da Fig. 5. Percebe-se que irradiação inclinada é menor do que em Cruzeiro do Sul, Feijó apresenta mínima de 1,59 kWh/m².dia e máxima de 3,72 kWh/m².dia. Deste modo, a irradiação média anual é de 667,95 kWh/m².ano.

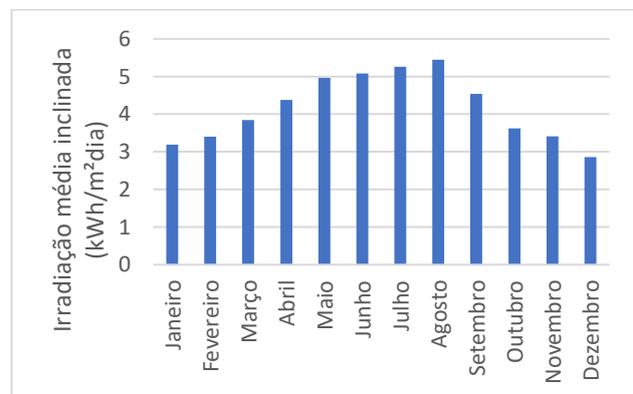


Fig. 5 Irradiação Média Inclinada de Feijó e Tarauacá.

Ao considerar o mesmo painel fotovoltaico utilizado na simulação de Cruzeiro do Sul, que tem como características a potência de 400W e rendimento de 0,1887, tem-se que os

painéis de usina fotovoltaica com capacidade de suprir a carga de Feijó ocupam uma área de 22,7 ha. Além disso, o investimento necessário é de aproximadamente US\$14.335.000,00 (quatorze milhões, trezentos e trinta e cinco mil dólares).

Sobre a emissão de CO₂ desta usina, calcula-se em torno de 1.073,89 tCO₂, e assim como na usina de Cruzeiro do Sul, considerando 100% da carga, a emissão da geração solar é 16 vezes menor que a GT a diesel.

Agora, considerando um sistema híbrido, com participação de 75% de GF, tem-se um investimento de US\$ 10.752.000,00 (dez milhões, setecentos e cinquenta e dois mil dólares) para instalação da usina fotovoltaica, que ocupa uma área de 17 ha, com uma geração de 10 MWp. O sistema híbrido será responsável pela emissão de mais de 5.000 tCO₂, das quais 84,7% são provenientes da GT.

Outro sistema a ser considerado trata da utilização das duas fontes igualmente, na qual a emissão de gás carbônico aumenta para 9.439 tCO₂. No entanto, o investimento necessário é de US\$ 7.167.000,00 (sete milhões, cento e sessenta e sete mil dólares). Ademais, a usina fotovoltaica apresenta uma potência de pico de 6,8 MWp, ocupando uma área de 11,6 ha.

5.3 Tarauacá

Dentre as três cidades analisadas, Tarauacá está mais próxima da capital acreana, cerca de 400 km. No entanto, a distância para a cidade vizinha, Feijó, é de apenas 48 km. Devido a essa proximidade e a escassez de dados na região, foi considerado que a irradiação inclinada para Tarauacá é igual a irradiação de Feijó.

Ainda, considerando o mesmo painel fotovoltaico das duas cidades anteriores, obtém-se a potência de pico necessária para suprir a carga de Tarauacá (Fig. 1), que é de 18 MWp. Para isso, será preciso um investimento de US\$ 18.857.000,00 (dezoito milhões, oitocentos e cinquenta e sete mil dólares). A área de painéis ocuparia aproximadamente 29 ha, apresentando uma emissão de 1.367 tCO₂.

Ao considerar 25% de participação da GT a diesel, a emissão de gás carbônico atinge o valor de 6.692 tCO₂, sendo necessária a instalação de uma usina fotovoltaica de 13,5 MWp, com custo de investimento é de US\$ 14.143.000,00 (quatorze milhões, cento e quarenta e três mil dólares).

Por fim, ao simular valores de geração iguais para fotovoltaica e térmica, tem-se que a emissão de gás carbônico aumenta para 12.016 tCO₂. Ademais, as características da usina fotovoltaica para este caso são: potência de pico de 9 MWp, área de 14,5 ha e custo de US\$ 9.429.000,00 (nove milhões, quatrocentos e vinte e nove mil dólares).

5.4 Comparações

Como o esperado, a GF apresenta uma emissão de gás carbônico muito inferior à emissão da GT a diesel, como apresentada na Fig. 6 a redução da emissão com o aumento da inserção de GF (50%, 75% e 100%) é considerável, principalmente para Cruzeiro do Sul. Na Tabela 1, na qual considera-se que a tecnologia fotovoltaica gere toda a energia necessária para abastecer as cidades, observa-se um valor de investimento alto, visto que se trata de um sistema isolado que necessita de armazenamento de energia.

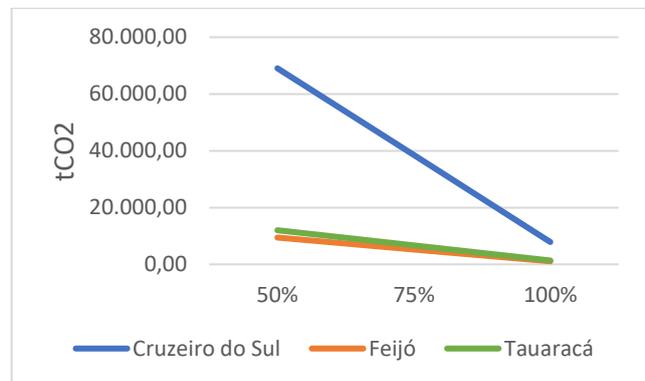


Fig. 6 Redução de emissão de CO₂ conforme aumento da GF.

Tabela 1. Resultados para 100% da carga suprida pela GF.

	Cruzeiro do Sul	Feijó	Tarauacá
ECO ₂ GT (tCO ₂)	130.262,30	17.804,00	22.666,20
ECO ₂ GF (tCO ₂)	7.856,90	1.073,90	1.367,10
Potência GF	100 MWp	13 MWp	18 MWp
Recurso GF	\$105.398.000,00	\$14.335.000,00	\$18.857.000,00
Área GF	74 ha	22,7 ha	29 ha

Considerando um sistema de 25% térmica e 75% fotovoltaica, conforme a Tabela 2, tem-se um sistema mais confiável e com custo de investimento 25% menor. No entanto, a emissão do principal gás do efeito estufa aumenta aproximadamente 5 vezes. Ainda assim, a emissão é 3,4 vezes menor que a ocasionada pela produção de energia utilizando apenas óleo diesel.

Tabela 2. Resultados para 75% da carga suprida pela GF.

	Cruzeiro do Sul	Feijó	Tarauacá
ECO ₂ GT (tCO ₂)	32.565,6	4.451,0	5.666,5
ECO ₂ GF (tCO ₂)	5.892,7	805,4	1.025,4

Potência GF	75 MWp	10 MWp	13,5 MWp
Recurso GF	\$79.000.000,00	\$10.752.000,00	\$14.143.000,00
Área GF	55 ha	17 ha	21 ha

Já, um sistema composto de 50% de GT e 50% fotovoltaica, Tabela 3, como esperado os valores de investimento para GF caem 50%, já a emissão de CO₂ aumenta em aproximadamente 259%, comparando a emissão com 25% da carga abastecida pela GT. No entanto, quase 2 vezes menor que a emissão de CO₂ utilizando apenas GT a diesel.

Tabela 3. Resultados para 50% da carga suprida pela GF.

	Cruzeiro do Sul	Feijó	Tarauacá
ECO ₂ GT (tCO ₂)	65.131,1	8.902,0	11.333,1
ECO ₂ GF (tCO ₂)	3.928,5	536,9	683,6
Potência GF	50 MWp	6,8 MWp	9 MWp
Recurso GF	\$53.000.000,00	\$7.168.000,00	\$9.429.000,00
Área GF	37 ha	11 ha	14,5 ha

É interessante notar a diferença de investimento em GF das cidades Feijó e Tarauacá com Cruzeiro do Sul, o valor necessário para um sistema híbrido de 50% em Cruzeiro é suficiente para cobrir os custos de uma usina que abastece 100% das cargas de Feijó e Tarauacá. Ademais, as duas últimas cidades analisadas apresentam uma pequena diferença, nota-se que 75% da potência de pico da usina de Tarauacá é mais do que suficiente para abastecer 100% da carga de Feijó.

6. CONCLUSÕES

A interligação dos sistemas elétricos da Região Norte ao SIN foi e é um processo difícil e demorado, definido por barreiras naturais e a busca por sustentabilidade. Nesse entremeio, encontram-se as cidades do sistema isolado, que em sua maioria tem seu consumo abastecido por termelétricas a diesel, o que é um paradigma na premissa de sustentabilidade na Amazônia.

Ao analisar as cidades acreanas, Cruzeiro do Sul, Feijó e Tarauacá, observa-se a confirmação deste paradigma. Cidades de porte pequeno que apresentam características climáticas favoráveis a geração fotovoltaica, com irradiação média de 4,5 kWh/m².dia., são abastecidas a partir da GT, com emissões anuais de até 130 mil tCO₂.

Ainda que não seja interessante a utilização apenas da geração fotovoltaica, pelo alto custo de investimento, os sistemas híbridos (GF+GT) para as localidades estudadas são capazes de reduzir os valores de emissão de CO₂ em aproximadamente 47%, no último caso apresentado. Deste

modo, a inserção de UFV nestes sistemas isolados é uma oportunidade de contribuição para redução de GEE no sistema elétrico brasileiro.

REFERÊNCIAS

- Barbosa Filho, W. P. *et al.* (2015) “Expansão Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil: Impactos Ambientais e Políticas Públicas”, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 4, p. 628.
- BNDES (2013) “O bndes e a questão energética e logística da Região Amazônica”, *Informe Setorial*, 31(2), p. 1–4.
- Bosch (2013) “Installation and Safety Manual for the c-Si M60 (S) NA 30117 and NA 42117 Families of Crystalline Photovoltaic Modules”, *Bosch Solar Energy Corp.*, 1.
- Brasil (2010) “Decreto N°7.246, de Julho de 2010. Regulamenta a Lei N° 12.111, de 9 de dezembro de 2009, que dispõe sobre o serviço de energia elétrica dos sistemas isolados.”
- Castilho, D. (2019) “HIDRELÉTRICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA : DA EXPANSÃO À ESPOLIAÇÃO”, *V Simposio Internacional de la Historia de la Electrificación*, p. 68–87.
- Ceeac, C. de E. em E. do A. (2020) *Estações Solarimétricas*.
- Chávez-rodríguez, M. *et al.* (2013) “Potencial De Aproveitamento De Painéis Fotovoltaicos Nos Sistemas Isolados Da Amazônia : Brasil , Bolívia ”, (October), p. 22–24.
- Cunha, K. B. da, Soares, M. e Silva, A. F. da (2018) “Acesso aos serviços de energia elétrica nas comunidades isoladas da Amazônia: mapeamento”, *IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente*.
- Dantas, O. D. L., Apolônio, R. e Junior, A. A. (2019) “Potencial da geração distribuída e seu impacto na redução de emissões de CO₂ : Estudo de uma micro usina fotovoltaica conectada à rede de energia elétrica.”, *Engevista - UFF*, p. 329–340.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019) “Sistemas Isolados: Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados, Horizonte 2023 - Ciclo 2018”, p. 1–18.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021) “EPE conclui cadastramento para o Leilão dos Sistemas Isolados/2021”, p. 1–2.
- EPE (2016) “Estudo de alternativas para suprimento de energia elétrica ao Oiapoque pelo Sistema Interligado Nacional”, *Empresa de Pesquisa Energética*, p. 1–18.

- EPE, E. de P. E. e MME, M. de M. e E. (2018) “Nota Técnica PR 07/18: Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050. Série: Estudos de Longo Prazo”, *Empresa de Pesquisa Energética*, p. 127.
- Ferrão, A. L. L. da C., Tormam, M. F. e Guedes, H. A. S. (2015) “IV-116 – Análise da Variabilidade Anual da Qualidade da Água”, p. 1–10.
- FGV CPDOC, C. de P. e D. de H. C. do B. (2021) *Eletronorte*.
- Freitas, D. V. *et al.* (2020) “Comparação entre valores de irradiação no plano inclinado na latitude medida e calculada a partir dos softwares Radiasol e Radiasol2”, *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- IBGE (2020) *Cruzeiro do Sul*.
- IBGE, C. D. 2010. (2010) *População residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, segundo as Unidades da Federação – 2010*.
- IBGE, C. de L. S. (2020) *Lista de Municípios da Amazônia Legal*.
- Junior, H. de S. M. *et al.* (2010) “Aplicação de energia solar fotovoltaica- UM estudo de caso na regioao Amazonica.”, *Revista Geonorte*, 3(5), p. 1303–1309.
- Lawson, A. e Pereira, G. (2017) “Termelétricas E Seu Papel”, *FGV Energia*.
- Lorenzo, H. C. de (sem data) “O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO: PASSADO E FUTURO”, *Perspectivas: Revista de Ciências Sociais*, 24–25, p. 147–170.
- Lourenço, T. M. de F. (2016) *Emissão De Gases De Efeito Estufa Na Produção De Energia Elétrica Gerada Por Usinas Hidroelétricas, Eólicas E Termoelétricas No Brasil*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- MIRANDA, M. M. DE (2012) *Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicação da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida*. Universidade de São Paulo.
- Moreira, J. R. S. (2017) *Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética*.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2021a) *O Sistema Interligado Nacional*.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (2021b) *Sistemas Isolados*.
- Pires da Ponte, G. (2019) *Geração de energia elétrica em Sistemas Isolados: desafios e propostas para aumento da participação de fontes renováveis com base em uma análise multicritérios*.
- Pivetta, M. (2020) “Amazônia, agora, é fonte de CO₂”, *Pesquisa FAPESP*.
- Queiroz, L. G. O. *et al.* (2019) “Geração distribuída fotovoltaica e seu impacto na redução de emissões de CO₂: estudo de caso de uma usina fotovoltaica situada no semiárido potiguar”, *Conimas*.
- Relva, S. G. (2020) “Projeto de automação e eficiência energética na Universidade Federal do Acre”. Rio Branco.
- Ribeiro, E. B. (2018) “energia fotovoltaica – estudo do funcionamento, instalação e sua viabilidade no Brasil”. Anápolis/GO.
- Rocha, L. C. (2012) *Diagnóstico das emissões de co2 na geração termelétrica de manaus e as possibilidades no mecanismo de desenvolvimento limpo*. Universidade Federal do Amazonas.
- SCG, S. de C. e A. de G. (2021) *Lista de Usinas por Estado/Município, Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA)*.
- Seger, S., Mercedes, P. e Rico, J. A. P. (2015) “Uma revisão histórica do planejamento do setor elétrico brasileiro”, *Revista USP*, 104, p. 13–36.
- Viscondi, G. de F., Silva, A. F. e Cunha, K. B. (2016) “Geração termoeétrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle”, *IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente*, p. 38.
- Wilke, H. (2015) *Diagnóstico das Usinas Termelétricas dos Sistemas Isolados do Ponto de Vista de Adequação aos Limites de Consumo Específico de Combustível, Estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e Proposição de Alternativas para Redução dos Mesm*, *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá*.