

Simulação Da Inserção De Energia Fotovoltaica Em Instituições De Ensino: Uma Análise Dos Impactos Energéticos E Ambientais

Humberto De Oliveira Trindade¹, Mauricio Sperandio¹, Glauco Oliveira Rodrigues², Gilnei Luiz De Moura², Eugênio De Oliveira Simonetto², Neimar Ferreira²

¹(PPGEE - Programa De Pós Graduação Em Engenharia Elétrica, Universidade Federal De Santa Maria, Brasil)

²(PPGA – Programa De Pós Graduação Em Administração, Brasil)

Resumo

Contexto: A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis tem impulsionado a adoção de sistemas fotovoltaicos como alternativa às fontes tradicionais. A energia solar destaca-se por ser uma solução limpa e viável, principalmente em países com alta incidência solar. Neste contexto, instituições de ensino buscam alternativas para reduzir o consumo de energia convencional e as emissões de CO₂. Este estudo visa avaliar, por meio de simulação, o impacto da inserção de sistemas fotovoltaicos no consumo energético e na redução das emissões de carbono.

Materiais e Métodos: Neste estudo prospectivo, foi desenvolvido um modelo de dinâmica de sistemas utilizando o software Vensim, com horizonte temporal de 72 meses. Foram simulados quatro cenários distintos de adoção de energia fotovoltaica: atual (sem inserção), otimista, ideal e máximo. As principais variáveis analisadas foram a energia consumida, a capacidade de geração fotovoltaica e a redução das emissões de CO₂. O modelo considerou dados históricos de consumo e produção de energia, além de fatores climáticos para estimar a eficiência da geração solar.

Resultados: Os resultados mostraram que a adoção de sistemas fotovoltaicos impacta diretamente a redução do consumo de energia da rede e das emissões de CO₂. O cenário otimista apresentou a maior redução, com economia média de 200 MWh mensais e diminuição de até 500 kg de CO₂ em relação ao cenário atual ($p < 0,05$). Já o cenário máximo explorou o limite regulatório para instalação de painéis solares, apresentando significativa redução no consumo, embora limitado por fatores operacionais e intermitência solar.

Conclusão: A inserção de sistemas fotovoltaicos demonstrou ser uma solução eficaz para a redução do consumo de energia e das emissões de carbono. O cenário otimista destacou-se como a melhor estratégia para maximizar os benefícios econômicos e ambientais, reforçando a importância de um planejamento estratégico para adoção de energias renováveis em instituições de ensino.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Simulação; Dinâmica de sistemas; Consumo energético; Redução de emissões.

Date of Submission: 25-02-2025

Date of Acceptance: 05-03-2025

I. Introdução

Nas últimas décadas, a energia fotovoltaica tem emergido como uma solução estratégica para a transição energética global. A capacidade de converter a radiação solar em eletricidade, sem emissões de gases de efeito estufa, posiciona essa tecnologia como um elemento essencial para a mitigação das mudanças climáticas e para a diversificação das matrizes energéticas. No contexto brasileiro, caracterizado por alta incidência solar e desafios na universalização do acesso à energia, a adoção de sistemas fotovoltaicos representa uma oportunidade significativa para impulsionar a sustentabilidade e a inclusão energética.

Dentre os principais desafios enfrentados pelas instituições de ensino superior brasileiras, destaca-se a necessidade de mitigar os impactos ambientais de suas operações e, simultaneamente, promover a eficiência energética. Nesse cenário, a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) tem investido na inserção de sistemas fotovoltaicos em seu campus, buscando reduzir a dependência de fontes energéticas convencionais e suas respectivas emissões de carbono. Entretanto, a implementação efetiva dessas tecnologias requer uma compreensão profunda das dinâmicas complexas que governam o consumo de energia e a geração fotovoltaica.

Este estudo parte da seguinte questão de pesquisa: Como diferentes níveis de adoção de energia fotovoltaica podem impactar o consumo energético e a redução de emissões de CO₂ na UFSM?. O objetivo principal é avaliar o impacto da implementação de sistemas fotovoltaicos no consumo de energia elétrica e nas

emissões de carbono da UFSM, por meio de um modelo de dinâmica de sistemas que simula diferentes cenários de inserção dessa tecnologia.

A metodologia utilizada baseou-se nos conceitos de dinâmica de sistemas propostos por Sterman (2000), que permitem modelar as interações entre variáveis endógenas e exógenas de sistemas complexos. O modelo foi desenvolvido com o software Vensim, estruturando-se em estoques, fluxos e laços de feedback para capturar as interações não lineares entre geração fotovoltaica, consumo energético e emissões de CO₂. Foram analisados quatro cenários distintos, variando de uma adoção mínima a uma implementação ideal e máxima, com horizonte temporal de 72 meses.

Este trabalho está estruturado em cinco seções. Após esta introdução, a seção seguinte apresenta a fundamentação teórica sobre energia fotovoltaica e sua relevância para a sustentabilidade ambiental. Em seguida, detalha-se a metodologia utilizada, abordando a construção do modelo dinâmico e os cenários simulados. Os resultados obtidos são discutidos na quarta seção, com ênfase nos impactos econômicos e ambientais de cada cenário. Por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações estratégicas para a adoção de energia fotovoltaica em instituições de ensino superior.

Com base nessa estrutura, o artigo busca contribuir para a literatura sobre transição energética no contexto universitário e fornecer subsídios para a tomada de decisão estratégica voltada à sustentabilidade em instituições de ensino.

II. Desenvolvimento

A dinâmica de sistemas é uma abordagem metodológica usada para entender o comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo. Desenvolvida inicialmente por Jay Forrester nos anos 1950, essa metodologia utiliza diagramas de feedback e equações diferenciais para modelar a interação entre diferentes componentes de um sistema. O objetivo central da dinâmica de sistemas é capturar as relações de causa e efeito, identificar padrões de comportamento e prever como diferentes políticas ou mudanças no sistema podem afetá-lo no longo prazo. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em várias áreas, como economia, gestão, meio ambiente, e, recentemente, no estudo de energias renováveis.

No caso da inserção de energia limpa, como a solar, a dinâmica de sistemas oferece uma ferramenta valiosa para modelar a transição energética. Um dos maiores desafios dessa transição é entender a interação entre variáveis técnicas, econômicas e sociais. O modelo desenvolvido para simular a introdução da energia solar no mix energético utiliza diagramas causais e estoques e fluxos para representar como fatores como custos de instalação, políticas governamentais de incentivo, demanda por energia e avanços tecnológicos se inter-relacionam e influenciam o crescimento dessa fonte de energia.

O modelo desenvolvido para simular a inserção de energia solar começa com a definição das principais variáveis envolvidas no processo, como a capacidade instalada de energia solar, os custos relacionados ao consumo de energia e os subsídios governamentais. Essas variáveis são conectadas por laços de feedback que mostram como a mudança em uma variável pode afetar outras e gerar dinâmicas de crescimento ou de estabilização.

Este modelo de dinâmica de sistemas foi desenvolvido com o objetivo de simular a inserção de energia fotovoltaica (PV) nas universidades, utilizando a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como estudo de caso. O foco central é avaliar o impacto da adoção de sistemas fotovoltaicos no consumo de energia da universidade, bem como os benefícios ambientais associados à substituição da geração tradicional por fontes renováveis.

As principais variáveis do modelo incluem:

Energia consumida: Quantidade total de eletricidade demandada pela UFSM para suas operações, incluindo iluminação, climatização, equipamentos e outros usos cotidianos. Essa variável representa a demanda energética da instituição ao longo do tempo e é um ponto crítico para avaliar o impacto da inserção de fontes renováveis.

Capacidade de geração fotovoltaica: Esta variável reflete a quantidade de eletricidade que pode ser gerada pelos sistemas fotovoltaicos instalados na universidade. Ela depende da área disponível para instalação de painéis, da eficiência dos módulos fotovoltaicos e da radiação solar disponível na região. A capacidade de geração será modelada para diferentes cenários, considerando o aumento progressivo de sistemas PV e suas contribuições à matriz energética da UFSM.

Redução das emissões: Para calcular os benefícios ambientais da geração fotovoltaica, o modelo compara a eletricidade gerada a partir de fontes renováveis com a quantidade equivalente que seria gerada por termelétricas, uma das fontes de energia mais poluentes. A comparação entre a geração PV e a termelétrica permitirá quantificar a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), associando cada kWh gerado pela energia solar a uma quantidade evitada de emissões que seria típica de termelétricas a base de combustíveis fósseis.

O modelo é estruturado em diagramas de feedback, capturando as interações entre essas variáveis. Por exemplo, à medida que a capacidade de geração fotovoltaica aumenta, a dependência de fontes de energia convencionais diminui, gerando um ciclo positivo que reduz o custo energético da universidade e minimiza as emissões de gases de efeito estufa. Ao mesmo tempo, o modelo considera a intermitência da geração solar e o impacto nos custos de energia durante períodos de baixa geração solar.

Além disso, o modelo foi calibrado para explorar diferentes cenários de penetração da energia solar na UFSM. Simulações são executadas para verificar como mudanças na capacidade instalada de sistemas PV podem impactar o consumo de energia da universidade e suas emissões associadas levando em consideração possíveis aumentos no consumo de eletricidade ao longo do tempo devido à expansão das atividades acadêmicas e de pesquisa.

Os resultados esperados do modelo fornecem um panorama claro sobre o potencial de adoção de sistemas fotovoltaicos em universidades, demonstrando não apenas a viabilidade econômica, mas também os impactos ambientais positivos. Essa simulação serve como uma ferramenta importante para a tomada de decisões estratégicas, auxiliando na criação de políticas internas que incentivem a adoção de energia limpa e a sustentabilidade no campus.

Com o uso da dinâmica de sistemas, o modelo é capaz de prever o comportamento do sistema a longo prazo e oferece uma visão integrada de como diferentes políticas e tecnologias podem acelerar a transição para um modelo energético mais sustentável, especificamente no contexto universitário.

A Figura Xpv representa o modelo de dinâmica de sistemas desenvolvido para simular a adoção de energia fotovoltaica (PV) na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Esse modelo busca capturar as interações entre diferentes variáveis que afetam o comportamento do sistema energético ao longo do tempo, utilizando diagramas típicos de estoques e fluxos. A figura ilustra como a capacidade instalada de sistemas PV, o consumo de energia da universidade e a redução de emissões de CO₂ estão interligados, além de destacar as influências de fatores econômicos e políticas governamentais.

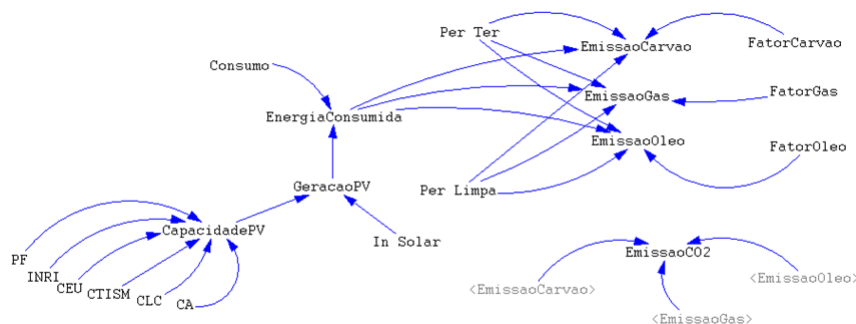
Os estoques principais que aparecem no diagrama são a energia consumida e a capacidade de geração fotovoltaica, que mostra o montante acumulado de sistemas PV instalados. Os fluxos associados incluem a instalação de novos sistemas fotovoltaicos, que aumenta a capacidade instalada ao longo do tempo, e o consumo de eletricidade, que reflete a energia utilizada nas operações diárias da instituição.

A figura também destaca os laços de feedback que regulam o comportamento do sistema. Um feedback positivo é observado quando o aumento da capacidade de geração PV reduz a dependência de fontes convencionais, o que leva à diminuição dos custos operacionais e das emissões de CO₂. Por outro lado, um feedback negativo ocorre devido à intermitência da radiação solar, exigindo fontes de energia complementares, como baterias ou eletricidade da rede, para garantir a continuidade do suprimento durante períodos de baixa geração solar.

Outras variáveis auxiliares presentes na figura incluem políticas governamentais de incentivo, como subsídios e programas de financiamento, que influenciam diretamente o ritmo de instalação de novos sistemas PV. O custo de energia também é uma variável importante, sendo comparado entre a geração convencional, baseada em termelétricas, e a renovável, baseada em energia solar. A redução de emissões de CO₂ é um dos resultados fundamentais do modelo, quantificando o impacto positivo da substituição de fontes fósseis por renováveis.

A Figura 1 apresenta essas interações de forma integrada, permitindo a análise de diferentes cenários de penetração da energia solar na universidade. Em cenários otimizados, o aumento progressivo da capacidade de geração PV leva à significativa redução do consumo de energia convencional e das emissões. No entanto, o modelo também leva em consideração o aumento da demanda energética ao longo do tempo, devido à expansão das atividades acadêmicas e de pesquisa.

Figura 1. Modelo Proposto



Fonte: Autor (2024)

O modelo captura a interação entre a capacidade instalada de PV, o consumo de energia e as emissões evitadas. O foco é maximizar a capacidade de geração fotovoltaica para reduzir a dependência de energia de fontes fósseis e, assim, minimizar as emissões de CO₂ associadas ao carvão, gás e óleo. A energia consumida é reduzida pela produção interna, e os cálculos de emissões permitem simular cenários comparativos, destacando o impacto positivo da transição para fontes renováveis. Essas variáveis formam o núcleo do modelo, permitindo à UFSM planejar e avaliar como diferentes níveis de instalação de painéis solares impactam o consumo energético e contribuem para a sustentabilidade ambiental. O Quadro 1 a seguir apresenta informações sobre as variáveis desenvolvidas.

Quadro 1. Equações do Modelo Proposto

1. CapacidadePV = CA+CEU+CLC+CTISM+INRI+PF
2. GeracaoPV = CapacidadePV*In Solar
3. EnergiaConsumida = Consumo-GeracaoPV
4. EmissaoCarvao = ((EnergiaConsumida*Per Ter)-(EnergiaConsumida*Per Limpa))*FatorCarvao
5. EmissaoGas = ((EnergiaConsumida*Per Ter)-(EnergiaConsumida*Per Limpa))*FatorGas
6. EmissaoOleo = ((EnergiaConsumida*Per Ter)-(EnergiaConsumida*Per Limpa))*FatorOleo

Placas Fotovoltaicas (PV)

Segundo Ebert (2019), a energia elétrica é produzida a partir de módulos constituídos de células fotovoltaicas, transformando diretamente a irradiação solar em energia elétrica através de uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor. As células são conectadas em série ou paralelo, conforme as necessidades de tensão e corrente elétrica. Os semicondutores mais apropriados para a conversão fotovoltaica são silício cristalino e silício amorfo hidrogenado. O cristalino atinge 20% de eficiência em laboratório e entre 7 a 18% na indústria. Já o amorfo atinge 12% no laboratório e 7 a 8% na indústria. Eficiência menor mas mais barato que o cristalino (FARRET, 1999).

Os módulos produzem energia elétrica em corrente contínua de 12, 24 ou 48 V. Tais módulos não trabalham sozinhos. Como a produção é em corrente contínua, faz-se necessários inversores, para transformar a energia elétrica de corrente contínua em corrente alternada, bem como equipamentos de segurança tais como disjuntores, supressores de surto, cabeamentos, etc. Essencial também um conjunto de baterias para armazenar a energia produzida em corrente contínua. Outra peça fundamental em uma estrutura PV é o controlador de carga que otimiza e conforma o uso da energia fotovoltaica gerada pelos módulos de acordo com as necessidades e ainda protege a bateria contra sobrecargas e descargas abruptas. Todos os elementos juntos constituem em uma usina fotovoltaica. Neste trabalho, é usado o termo placa fotovoltaica (PV) mas se referindo aos módulos e todos os equipamentos mencionados.

Quanto ao uso desta energia, ela pode ser inserida na rede elétrica (sistema on grid) ou ser usada isoladamente (sistema off grid).

Segundo Farret (1999), geralmente a eficiência da conversão de uma célula solar, ou seja, a relação entre a potência elétrica gerada e a potência de irradiação incidente sobre o semicondutor é na ordem de 10%. Dessa maneira, num dia claro, pode ser gerada uma potência de 100 W/m².

Sob a ótica ambiental o uso desta energia renovável substitui a energia que seria produzida por um combustível fóssil, desta maneira reduz a emissão de CO₂ por excelência. Diversos trabalhos quantificam esta redução, tais como em (Santos et al., 2023).

A UFSM tem em seu Campus Sede, uma estrutura de geração fotovoltaica de 240 kW distribuídas em vários pontos. Próximo ao parque de exposições, há uma PV de 10 kW, no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) há PV de 10 kW no telhado e uma usina no solo de 100 kW. Na Casa do Estudante Universitário (CEU), um sistema de placas com capacidade de 20 kW foi instalada. O Colégio Industrial de Santa Maria (CTISM) tem instalado 80 kW. Há dois Carport. Cada um com potência de 10 kW e um novo será instalado com potência trifásica de 22 kW. Além disso, uma nova usina será instalada de 400 kW. Desta maneira há atualmente 240 kW de capacidade instalada e futuramente será 662 kW.

Para calcular a produção de energia de uma usina fotovoltaica, pode ser usada a seguinte fórmula:

$$E=P \times H \times F$$

onde:

- E é a energia produzida em kWh,
- P é a potência instalada em kW (neste caso, 240 kW),
- H é o número de horas de insolação (horas de pico de sol) por dia. Para o H será considerado o histórico de duração de sol na região da UFSM para os meses de janeiro a abril de 2024 (Timeanddate, 2024)
- F é o fator de capacidade (geralmente varia entre 0 e 1, dependendo da eficiência do sistema e das condições climáticas). A UFSM fica na latitude -29.716013 e longitude -53.716184. Valendo de sua localização, foram

extraídos do mesmo site as condições climáticas de cada dia para a obtenção do fator F. Será considerado o histórico de clima de janeiro a abril de 2024.

Tabela 1. Impacto da presença de PV – valores calculados em MWh

	Consumo Ponta	Cons. Fora ponta	Produção PV	Consumo s/ PV	Representatividade (%)
Janeiro/2024	97,96	1111,8	62,88	1174,68	5,35
Fevereiro/2024	95,82	1121,44	59,19	1180,63	5,01
Março/2024	122,67	1316,02	64,64	1380,66	4,68
Abril/2024	126,13	1144,42	44,62	1189,03	3,75

Fonte: Próprio Autor com dados da fatura de energia e do site timeanddate

O INRI dispõe de medição em tempo real e os resultados são menores porque há perdas que não foram consideradas no cálculo acima bem como outros fatores. No entanto, o cálculo serve para criar um parâmetro para modelagem de inserção de PV's na rede interna da UFSM. Por questão de norma salienta-se que o limite de inserção de PV é de 3000 kWp. Acima disso a UFSM se tornaria uma fornecedora de energia, o que não é o objetivo aqui. Com o intuito de comparação a Tabela XX mostra a média gerada na usina do INRI nos primeiros quatro meses do ano de 2019 a 2023.

Tabela 2. Média da geração mensal de energia da PV de 100 kW do INRI

	Energia gerada (MWh)
Janeiro (2019-2023)	7,06
Fevereiro (2019-2023)	6,63
Março (2019-2023)	7,25
Abril (2019-2023)	6,99

Fonte: Próprio Autor com dados da Ingecom Sum Monitor – PEE UFSM

Os dados mostram uma grande diferença entre teoria e prática. Pode-se inferir que na região, nos meses mais ensolarados do ano, uma PV de 100 kW produz 7 MWh por mês. Logo com as unidades juntas representando 240 kW de capacidade poderiam produzir 17 MWh por mês. Isso é 30% de 58MWh, que é a média da geração calculada na Tabela XX. Fica evidente as perdas na geração e outros fatores não considerados no simples cálculo.

Tendo estes dados em mente e sabendo o limite para inserção de novas usinas, surge a seguinte modelagem com o intuito de aumentar a representatividade de fontes renováveis de energia dentro do Campus para a busca da neutralidade do carbono:

III. Análise Dos Resultados

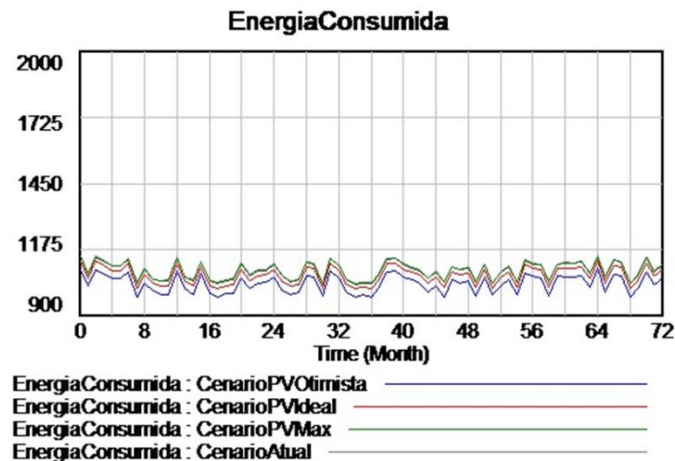
Os resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido foram simulados utilizando o software Vensim, um dos principais programas voltados para a modelagem e análise de dinâmica de sistemas. A simulação foi executada com um horizonte de tempo de 72 meses, permitindo avaliar o impacto da adoção de sistemas fotovoltaicos na UFSM a médio e longo prazo.

Com base nas variáveis estruturadas no modelo – como energia consumida, capacidade de geração PV e emissões de CO₂ – foi possível identificar padrões importantes. Durante o período de 72 meses, a projeção mostrou um aumento gradual da capacidade instalada de painéis fotovoltaicos, com influência direta na redução da energia adquirida da rede elétrica. Nos primeiros meses, o impacto da inserção de energia PV é moderado, mas à medida que novas instalações são incorporadas, observa-se uma redução progressiva no consumo de fontes tradicionais, evidenciando os benefícios econômicos e ambientais da transição energética.

A simulação realizada com o software **Vensim**, abrangendo um horizonte de **72 meses**, avaliou o impacto da implementação de sistemas fotovoltaicos (PV) no **consumo de energia** e nas **emissões de CO₂** da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A análise considerou quatro cenários distintos: **Cenário Atual**, **Cenário PV Otimista**, **Cenário PV Ideal** e **Cenário PV Máximo**. A seguir, são apresentados os principais resultados de forma integrada e sistemática:

Primeiramente, a figura 2 demonstra a energia consumida.

Figura 2. Energia Consumida



Fonte: Resultado (2024)

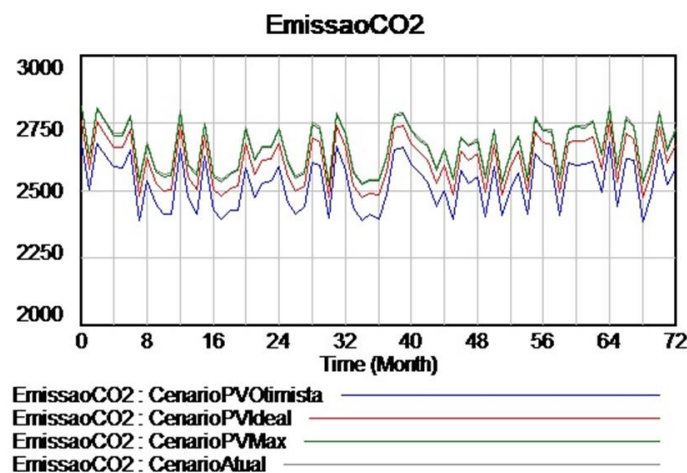
A mesma ilustra o comportamento do consumo de energia elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em Megawatt-hora (MWh), ao longo de 72 meses, considerando diferentes cenários simulados. Esses cenários foram projetados para avaliar o impacto da adoção de sistemas fotovoltaicos (PV) na redução do consumo energético da universidade. No gráfico, quatro curvas representam distintos cenários de consumo: Cenário Atual, Cenário PV Otimista, Cenário PV Ideal e Cenário PV Máximo.

O Cenário Atual reflete a situação sem alterações significativas na infraestrutura de geração de energia solar, ou seja, o consumo permanece dependente de fontes convencionais. Essa curva serve como base de comparação para avaliar o impacto dos demais cenários com sistemas PV. O Cenário PV Otimista simula uma adoção acelerada e extensa de sistemas fotovoltaicos, assumindo altos níveis de eficiência e uma capacidade instalada robusta. Como resultado, essa linha apresenta uma redução expressiva no consumo de energia convencional, indicando o melhor desempenho dentre os cenários simulados.

O Cenário PV Ideal apresenta um equilíbrio entre a capacidade instalada e limitações práticas, como períodos de baixa insolação e intermitência da geração solar. Embora também mostre uma redução no consumo em relação ao cenário atual, essa diminuição é um pouco menos acentuada do que no cenário otimista. O Cenário PV Máximo considera a instalação de painéis solares até o limite máximo regulamentar da universidade. Embora apresente uma melhoria considerável em comparação ao cenário atual, seu desempenho é limitado pela variabilidade da radiação solar e por desafios operacionais na geração distribuída.

Ao longo dos 72 meses, é possível observar flutuações sazonais em todos os cenários, possivelmente relacionadas às variações na atividade acadêmica, como o início de semestres letivos e períodos de recesso ou férias. Em geral, todos os cenários que contemplam a implementação de sistemas fotovoltaicos demonstram uma redução gradual e consistente no consumo de energia da rede elétrica, sendo o impacto mais pronunciado no cenário otimista. A figura 3 demonstra simultaneamente os quatro cenários.

Figura 3. Emissão CO2



Fonte: Resultado (2024)

Ela ilustra a projeção das emissões de CO₂ da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) ao longo de 72 meses, com valores expressos em kg de CO₂, considerando quatro diferentes cenários: Cenário Atual, Cenário PV Otimista, Cenário PV Ideal e Cenário PV Máximo.) O objetivo dessa simulação é analisar como a adoção de sistemas fotovoltaicos impacta a redução das emissões de carbono, comparando os resultados mês a mês.

No Cenário Atual, as emissões permanecem em torno de 2.750 kg de CO₂ por mês, com variações sazonais ao longo do ano, chegando a picos próximos de 2.900 kg de CO₂ durante períodos de maior atividade acadêmica. Esse cenário reflete a dependência atual da UFSM de fontes de energia convencionais, especialmente termelétricas, que geram maiores quantidades de emissões.

O Cenário PV Otimista demonstra a maior redução de emissões entre todos os cenários, com as emissões médias caindo para cerca de 2.400 a 2.500 kg de CO₂ por mês. Esse cenário reflete uma implementação ampla e eficiente de energia solar, aproveitando ao máximo a capacidade de geração fotovoltaica da universidade. A diferença em relação ao cenário atual chega a ser superior a 400 kg de CO₂ em alguns períodos, especialmente nos meses com maior insolação.

No Cenário PV Ideal, as emissões se mantêm entre 2.500 e 2.600 kg de CO₂ por mês, apresentando uma redução moderada em relação ao cenário atual, mas inferior ao desempenho observado no cenário otimista. Essa diferença pode ser explicada por limitações práticas, como intermitência na geração de energia solar e a necessidade de complementação com fontes convencionais em momentos de menor insolação.

O Cenário PV Máximo apresenta uma média de emissões entre 2.450 e 2.550 kg de CO₂ por mês, com picos ocasionais próximos de 2.700 kg de CO₂ em períodos de maior demanda energética. Embora esse cenário explore o limite máximo de capacidade fotovoltaica da UFSM, ele ainda não elimina completamente a necessidade de uso de energia da rede, o que gera flutuações nas emissões.

As flutuações observadas ao longo dos 72 meses sugerem um padrão sazonal, com picos de emissões durante os meses de maior atividade acadêmica (como o início dos semestres) e quedas durante os períodos de férias e recesso. Em todos os cenários que envolvem a adoção de energia fotovoltaica, verifica-se uma redução consistente nas emissões de CO₂, com os maiores impactos observados nos meses mais ensolarados.

Os resultados reforçam que a ampliação da capacidade de geração fotovoltaica é uma estratégia eficaz para a redução das emissões de carbono da universidade. A diferença entre o cenário atual e o cenário PV otimista mostra que é possível evitar a emissão de até 500 kg de CO₂ por mês, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e alinhando a UFSM às metas de neutralidade de carbono.

O comportamento do **consumo de energia** ao longo dos 72 meses revelou flutuações sazonais, com picos nos meses de maior atividade acadêmica e quedas durante férias e recessos. Em termos quantitativos, o consumo médio mensal variou conforme o cenário:

- **Cenário Atual:** Consumo estável em torno de **1.150 MWh**, chegando a **1.200 MWh** em períodos de maior demanda.
- **Cenário PV Otimista:** Consumo reduzido para uma faixa entre **950 MWh e 1.050 MWh**, com uma economia de até **200 MWh por mês** em comparação ao cenário atual.
- **Cenário PV Ideal:** Consumo médio entre **1.000 MWh e 1.100 MWh**, refletindo um impacto positivo, mas limitado por questões operacionais e pela intermitência solar.
- **Cenário PV Máximo:** Consumo mensal variando entre **975 MWh e 1.100 MWh**, explorando o limite da capacidade instalada, mas ainda com necessidade de suporte da rede elétrica.

O impacto mais significativo foi observado no **Cenário PV Otimista**, destacando-se como a melhor estratégia para reduzir a dependência de energia da rede elétrica, especialmente nos meses com maior insolação.

As emissões de CO₂ também apresentaram flutuações sazonais, alinhadas ao comportamento do consumo de energia. A simulação mostrou uma clara tendência de **redução nas emissões** à medida que a capacidade de geração solar aumentava:

- **Cenário Atual:** Emissões médias de **2.750 kg de CO₂** por mês, com picos chegando a **2.900 kg de CO₂** durante períodos de maior demanda.
- **Cenário PV Otimista:** Emissões reduzidas para uma faixa entre **2.400 e 2.500 kg de CO₂**, com economia de até **500 kg de CO₂ por mês** em relação ao cenário atual.
- **Cenário PV Ideal:** Emissões médias entre **2.500 e 2.600 kg de CO₂**, refletindo uma contribuição significativa para a redução de carbono, mas limitada por fatores operacionais.
- **Cenário PV Máximo:** Emissões entre **2.450 e 2.550 kg de CO₂**, mostrando que mesmo com a máxima capacidade instalada ainda existem flutuações devido à intermitência solar e à necessidade de complementação da rede.

Os resultados da simulação mostram que a ampliação da capacidade fotovoltaica pode trazer benefícios significativos tanto econômicos quanto ambientais para a UFSM. Em termos sistêmicos, a inserção de sistemas

PV permite uma redução consistente nas emissões de carbono e menor consumo de energia da rede elétrica, mas a eficácia depende de uma implementação estratégica que considere:

- **Intermitência solar:** A necessidade de sistemas complementares, como baterias, é crítica para garantir um fornecimento contínuo de energia.
- **Sazonalidade:** As flutuações de consumo e emissões exigem planejamento, especialmente para os meses de menor insolação.
- **Limite regulatório:** O cenário PV Máximo mostrou que há um teto para a inserção de energia solar, além do qual a UFSM poderia se tornar fornecedora de energia, algo fora do escopo atual.

IV. Considerações Finais

A simulação realizada com o software Vensim, projetada para um horizonte de 72 meses, revela que a adoção de sistemas fotovoltaicos é uma solução viável e estratégica para a redução do consumo de energia e das emissões de CO₂ na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os diferentes cenários analisados mostram que o impacto da inserção de sistemas solares vai além de uma simples substituição de fontes energéticas, envolvendo ganhos econômicos, operacionais e ambientais que podem posicionar a universidade como uma referência nacional na transição para uma matriz energética sustentável.

O Cenário PV Otimista destacou-se como o mais eficiente, promovendo uma significativa economia energética e uma redução média de 500 kg de CO₂ por mês em comparação ao cenário atual. Esse cenário evidencia a importância de investimentos robustos em geração solar, que podem transformar a matriz energética do campus e aproximar a universidade das metas globais de neutralidade de carbono. Por outro lado, o Cenário PV Ideal mostrou que, mesmo com limitações práticas, a implementação gradual e planejada da energia solar pode gerar resultados positivos, especialmente se acompanhada por políticas de gestão energética eficazes e incentivos externos.

Os resultados também evidenciam que, apesar das vantagens, existem desafios sistêmicos a serem superados. A intermitência solar é uma variável crítica, especialmente em períodos de baixa insolação, exigindo a adoção de tecnologias complementares, como baterias de alta capacidade e gestão inteligente de energia (smart grids), para garantir estabilidade no fornecimento. Além disso, a simulação revelou que a sazonalidade no consumo e na geração de energia precisa ser levada em conta no planejamento, já que há variações expressivas ao longo do ano que podem impactar tanto a demanda quanto a oferta energética.

Outro aspecto relevante é o limite regulatório para a inserção de sistemas fotovoltaicos na UFSM. O Cenário PV Máximo demonstrou que, ao alcançar a capacidade instalada próxima ao teto regulatório (3.000 kWp), a universidade ainda dependerá de energia complementar, especialmente em momentos de pico de demanda. Isso ressalta a necessidade de um planejamento estratégico alinhado às normativas vigentes, de modo a garantir que a transição para a energia solar seja realizada de forma eficiente e dentro dos limites operacionais e regulatórios.

Além dos benefícios energéticos e ambientais, a adoção de sistemas PV também traz impactos sociais e econômicos positivos. A implementação de energia solar pode fomentar oportunidades de ensino e pesquisa dentro da universidade, incentivando projetos acadêmicos voltados para energias renováveis e inovação tecnológica. A UFSM pode, assim, consolidar-se como um laboratório vivo de sustentabilidade, atraindo investimentos e parcerias, além de preparar profissionais capacitados para enfrentar os desafios da transição energética no Brasil e no mundo.

A partir dessa análise, fica claro que a transição para uma matriz energética sustentável deve ser acompanhada por uma gestão integrada e multidisciplinar, que envolva não apenas a ampliação da capacidade fotovoltaica, mas também a implementação de tecnologias de monitoramento e otimização do consumo. A criação de políticas internas que incentivem o uso consciente de energia, aliada a incentivos governamentais e parcerias com o setor privado, é essencial para que a universidade alcance um nível avançado de eficiência energética e redução de emissões de carbono.

Portanto, a UFSM tem nas mãos uma oportunidade estratégica de liderar a transição para uma matriz energética mais sustentável, consolidando-se como um exemplo para outras instituições de ensino superior. A adoção massiva de energia solar não apenas promove uma redução de custos operacionais e mitigação das emissões, mas também fortalece o compromisso institucional com a sustentabilidade, alinhando-se com as melhores práticas globais. Com um planejamento bem estruturado e a adoção de tecnologias de suporte, a universidade poderá contribuir de forma significativa para o desenvolvimento sustentável e se posicionar como referência em práticas inovadoras na área de energia renovável e gestão ambiental.

Referências

- [1] Ebert, P. S. (2019). Modelo De Gestão De Energia Para Consumidores Industriais Com Geração Distribuída. Tese De Doutorado, Universidade Federal De Santa Maria.
- [2] Farret, F. A. (1999). Aproveitamento De Pequenas Fontes De Energia Elétrica. Editora UFSM.
- [3] Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking And Modeling For A Complex World. McGraw-Hill.