

# Estudo sobre os Impactos da Implantação de Smart Grids com Fontes de Energia Renovável e Baterias para a Descarbonização de Cidades Inteligentes

A. L. V. Gimenes, M. E. M. Udaeta, P. Poloni, R. O. Silva, Escola *Politécnica da Universidade de São Paulo* - USP

**Abstract--** Decarbonization of isolated systems refers to reducing carbon emissions in regions that rely primarily on fossil fuel energy sources and are disconnected from main electrical grids. The implementation of smart grids in these regions enables the integration of renewable energy sources, such as solar and wind energy, as well as energy storage, reducing dependence on fossil fuels and promoting the advancement and development of smart cities through the transition to a cleaner and more sustainable electrical matrix. In this context, the present work aims, in addition to presenting the concepts surrounding these themes, to address a case study in which the main impacts of applying a smart grid with renewable generation and batteries in an isolated city, located in the Amazon region, are evaluated, which is currently served by a fossil fuel generation system. The results proved that it is possible to significantly reduce carbon emissions and optimize energy dispatch with such implementation, allowing government actions and incentives to boost this type of projects.

**Index Terms** — Energy storage, Smart Cities, Renewable energy, Isolated Systems, Smart Grids.

## I. INTRODUÇÃO

A descarbonização tem sido tema de extrema relevância mundial em meio à crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Estabelecer processos e metodologias de produção e consumo de energia de maneira limpa e sustentável são aspectos amplamente discutidos na indústria e na academia [1], [2]. Além da busca por reduzir ou eliminar a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), essas ações visam atenuar os impactos dessas substâncias no ambiente, consequentemente, as mudanças climáticas.

O conceito de cidade inteligente envolve o uso de tecnologias avançadas para melhorar a qualidade de vida dos que a habitam e tornar a cidade mais eficiente e sustentável.

A combinação desses dois conceitos pode levar a uma transformação significativa das cidades, tornando-as cidades mais limpas, eficientes e resilientes ao clima. Neste contexto, diversas soluções tecnológicas, políticas e ações de planejamento urbano têm sido propostas para tornar as cidades mais inteligentes e sustentáveis.

No que tange aos sistemas de energia elétrica isolados, segundo o Operador Nacional do Sistema (ONS), no Brasil existem 176 localidades isoladas e desconectadas do Sistema Interligado Nacional (SIN), a maior parte na região Norte [3]. Tais cidades são atendidas em sua maioria por sistemas de geração a diesel, os quais emitem toneladas de gases poluentes na atmosfera diariamente.

Quanto à matriz energética das cidades isoladas torna-se imprescindível a hibridização de sistemas de geração de energia baseados, principalmente, em combustíveis fósseis, através da implantação de sistemas com geração de energia limpa e renovável [2]. Tal aplicação conceitua o termo *Smart Grids*, ou redes inteligentes de energia, que além de resultarem em maior sustentabilidade para as cidades, permitem maior flexibilidade e segurança energética no fornecimento de energia elétrica aos consumidores [4].

Essa hibridização pode ser feita de diferentes maneiras, através da utilização de painéis solares, turbinas eólicas ou biogás para gerar energia renovável em conjunto com a usina a diesel, e ainda a partir da utilização de sistemas de armazenamento de energia com baterias para armazenar a energia gerada pelas fontes renováveis para uso posterior e para amortecer a intermitência de geração causada pelas variações meteorológicas do local [1],[5].

Este artigo busca identificar a contribuição dos sistemas de geração de energia renovável e armazenamento de energia para a hibridização de sistemas de geração baseados em combustíveis fósseis, no que se refere à descarbonização das cidades inteligentes para o fornecimento de energia elétrica. Para atingir tal objetivo, o presente trabalho está em Seção I: introdução; Sessão II: Contextualização, seção na qual

---

P. Poloni da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil (e-mail: poloni.patricia@hotmail.com).

R. Ortiz da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil (e-mail: renortiz.ros@gmail.com).

A. L. V. Gimenes, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil (e-mail: gimenes@pea.usp.br)

M. E. M. Udaeta, Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil (e-mail: udaeta@pea.usp.br)

apresenta-se uma breve conceituação dos macro temas principais deste trabalho; Seção III: Estudo de Caso, onde está apresentada a problemática da emissão de carbono em sistemas de geração de energia a partir de um exemplo de uma cidade no Amazonas; Seção IV: Estão apresentados os resultados da implementação do conceito de *Smart Grid* para o caso; e por fim na Seção V encontram-se as principais conclusões.

## II. CONTEXTUALIZAÇÃO

Os principais eixos estruturantes desenvolvidos neste estudo:

- I) Sistemas Isolados;
- II) *Smart Grids* e
- III) Cidades Inteligentes.

Com a predominância da geração hidrelétrica centralizada na matriz energética do país, verifica-se a necessidade da implantação de cada vez mais linhas de transmissão e distribuição, uma vez que os centros de geração dependem de fatores naturais, não necessariamente estando próximos aos centros de consumo [6].

Nesse aspecto, conforme apresentado em [6], a expansão explicada anteriormente acaba sendo travada pelo pouco interesse em empreendimentos dispendiosos, técnica e economicamente, para abastecer cargas pequenas localizadas a longas distâncias dos grandes centros. Para tais situações, a adoção de sistemas autônomos, em que as cargas estão diretamente ligadas à geração é a mais adequada.

De acordo com os dados da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) pode-se observar na Fig. 1 as divisões de recursos mais utilizados na matriz elétrica brasileira, tendo como base a divisão e a proporção dos recursos utilizados.

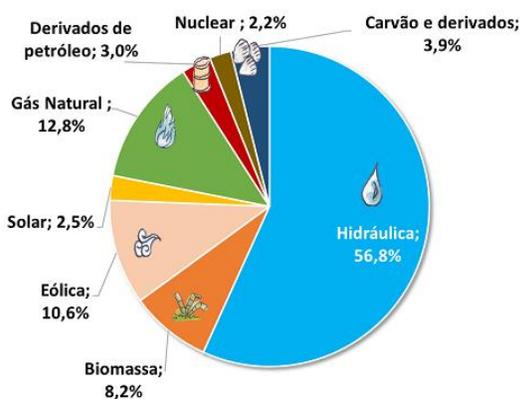


Fig. 1 Matriz Elétrica Brasileira [7].

Apesar de constituírem a maior parte da matriz elétrica brasileira, as grandes centrais geradoras hidrelétricas, assim como termelétricas convencionais ou nucleares, apresentam cada vez mais dificuldades para sua construção, devido aos impactos socioambientais que, inevitavelmente, causam. O mesmo pode-se dizer dos grandes sistemas de transmissão. Alternativas de geração distribuída e descentralizada, utilizando fontes não convencionais de energia, se tornam cada vez mais

competitivas, considerados não apenas os aspectos econômicos, mas também aspectos técnicos e operacionais [8].

O norte do Brasil é um exemplo de região com pequenas cargas distantes dos grandes centros, com aspectos ambientais relevantes como, por exemplo, a vegetação característica densa e alta, além de áreas de proteção ambiental, o que dificulta a implantação de quaisquer investimentos em linhas de transmissão ou grandes centrais geradoras. Além disso, a baixa densidade demográfica nesses locais torna economicamente inviável a chegada de longas linhas. Logo, a grande maioria dos Sistemas Isolados do território brasileiro localiza-se nestas regiões.

A seguir estão dispostos por tópicos, os principais estudos para sistematizar a relação e relevância do estudo deste trabalho.

### A. Sistemas isolados

Os Sistemas Isolados (SIs) são definidos como sistemas de energia elétrica que não estão conectados ao SIN, por razões técnicas ou econômicas, sendo que até 2023 foram mapeadas cerca de 176 localidades atendidas nessa modalidade, como mostra na (figura 2) [8]. De acordo com [9] uma das grandes indagações são as relações que permeiam o setor elétrico brasileiro pelo fato de que o tanto o SIN e quanto os SIs, que compõem a cadeia das linhas de distribuição de energia nacional, são operacionalizados, gerenciados e regulados pelos órgãos constituintes.

Assim, a partir de uma análise do momento histórico em que houve a implementação do SIN e de suas agências reguladoras, na década de 1990 iniciou-se um processo reestruturação do setor energético no Brasil, em que as empresas de energia elétrica passaram por uma grande privatização com a participação do capital estrangeiro em até 100%, sendo que inicialmente era de até 40%. Em 1995 com a maior abertura do mercado externo e em busca de uma estrutura de um Estado mínimo, diversas mudanças ocorreram, principalmente ligadas a matriz energética em um período Neoliberal.

A abordagem da evolução na reestruturação do SIN começou a influenciar a conceituação da energia como mercadoria e, por consequência, estabeleceu valores no mercado de energia e impulsionou a transformação da reprodução de capital. Dessa forma, é intensificada a desigualdade de determinadas regiões, em que ficou evidente o agravamento do processo estrutural [9].

A geração e transmissão de energia elétrica do Brasil é basicamente um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O SIN é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 0,6% da energia requerida pelo país encontra-se fora do SIN, em pequenos SIs localizados, principalmente, na região Amazônica [8].

A Lei nº 12.111/2009 prevê que as distribuidoras devem atender à totalidade dos seus mercados dos SIs por meio de licitação, na modalidade de concorrência ou leilão, a ser realizada direta ou indiretamente pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) de acordo com as diretrizes do MME (Ministério de Minas e Energia). Com algumas alterações no decreto nº 7.246/2010 (alterado pelo decreto

11.059/2022) os agentes de distribuição de energia elétrica deverão submeter à aprovação do MME, anualmente, o planejamento do atendimento dos mercados nos SIs.

Na Fig. 2 observa-se a distribuição geográfica dos sistemas isolados e a carga média, em MW, para cada região. O estado do Amazonas, possui a maior parte dos SIs, cerca de 53% das localidades estão neste estado, sendo que no total a demanda destes sistemas é de 572.8 MW médio.

desenvolvimento da eletrônica de potência, a qual também permitiu a introdução dos dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission*). Progressos notáveis foram introduzidos também na proteção e controle dos sistemas, que se valeram da evolução da tecnologia da eletrônica digital e da informática.

Também, a comercialização da energia no varejo, particularmente no tocante aos consumidores residenciais, sofreu alterações menores, restritas a poucos países. Uma novidade tecnológica importante foi a generalização do uso da geração distribuída, particularmente conectada aos sistemas de distribuição.

Atualmente, percebe-se a introdução de mudanças de natureza tecnológica, estrutural e regulatória, que têm o potencial para uma nova alteração do cenário. Essas mudanças acontecem tanto ao nível do grande sistema, grandes unidades de geração e transmissão quanto nos pequenos sistemas, sistema de distribuição, geração distribuída, microgeração e uso final [8].

A questão socioambiental, que também tem sido cada vez mais discutida no contexto da modernização das redes tem sido criticada em relação a produção de energia, dando voz ativa e poder para o processo de geração, transporte e consumo.

Nesse contexto, a expressão *Smart Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Ela carrega a ideia da utilização intensiva de tecnologia de informação e comunicação na rede elétrica, através da possibilidade de comunicação do estado dos diversos componentes da rede, o que permitirá a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso [8].

*Smart grids*, ou redes elétricas inteligentes, são sistemas avançados de distribuição de energia que incorporam tecnologias de comunicação e automação digital para melhorar a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade do fornecimento de energia [4]. Essas redes permitem a comunicação bidirecional entre as empresas de serviços públicos e os consumidores, possibilitando o monitoramento em tempo real, o controle e a otimização do suprimento e da demanda de eletricidade.

No contexto das *smart grids*, está incluído o conceito e a aplicação de energias renováveis, as quais referem-se a fontes de energia provenientes de recursos naturalmente renováveis, como a luz solar, o vento, a água (energia hidrelétrica), o calor geotérmico e a biomassa. Ao contrário dos combustíveis fósseis, que são finitos e contribuem para as mudanças climáticas, as fontes renováveis de energia são abundantes e têm baixas ou nulas emissões de carbono, tornando-as mais sustentáveis e amigáveis ao meio ambiente.

A integração de *smart grids* com sistemas de energias renováveis é crucial para maximizar os benefícios da geração de energia renovável. Nesse contexto, sistemas de armazenamento de energia, como baterias, são fundamentais para superar os desafios da intermitência das fontes de energia renovável. Esses sistemas de armazenamento permitem a coleta e o armazenamento da energia gerada em momentos de baixa demanda, para ser utilizada quando a demanda é alta ou quando as condições climáticas não são favoráveis para a geração renovável.



Fig. 2 Distribuição Geográfica dos SIs [8].

Em seus estudos, [6] diz ainda que mesmo que represente uma pequena parcela da população brasileira, o estudo de tais sistemas é importante, principalmente por atender a populações que são praticamente esquecidas pelos governos e mesmo pela própria população em geral. Aliado a isso o fato de que os recursos destinados a pagar o custo da geração dos SIs, predominantemente térmica a óleo diesel, são obtidos por meio do pagamento de toda a população em suas contas de consumo de energia.

Além disso, outro fator que tem impacto direto nos custos de geração de energia dos SIs é a programação do despacho das diversas unidades geradoras de uma usina. Normalmente, a programação adotada não segue nenhum critério de otimização, o que leva a gastos desnecessários de combustível [6].

### B. Smart Grids

Durante quase um século, os sistemas de energia elétrica cresceram e evoluíram tecnologicamente, porém mantendo os estudos propostos por Tesla e Westinghouse, conforme evolução. As centrais geradoras ficaram cada vez maiores e os sistemas de transmissão elevaram a tensão nominal, para atender as grandes distâncias e os grandes blocos de potência transmitidos [8].

Nesse aspecto, de acordo com [8], os sistemas isolados se interligaram para usufruir das vantagens de maior segurança e economia. A partir daí a transmissão em corrente contínua ressurgiu como opção para grandes distâncias graças ao

Em resumo, as *smart grids* desempenham um papel crucial na integração de fontes de energia renovável, tornando a geração e o consumo de eletricidade mais eficientes, confiáveis e sustentáveis. Essa combinação é fundamental para a transição para um sistema de energia mais limpo e para a redução das emissões de carbono, contribuindo assim, para a mitigação das mudanças climáticas.

### C. Cidades Inteligentes

Um dos principais desafios existentes é conseguir traduzir o conceito abstrato e complexo que envolve o assunto, “cidades inteligentes” para um formato prático a os gestores públicos, de maneira a orientá-los a conduzir a transformação de cidades tradicionais para inteligentes, independente de qual seja o contexto estudado ou o nível de desenvolvimento em que estas se encontram [11].

Independente dos desafios que envolvem ser inteligente, é notória a necessidade de reformulação que o território urbano brasileiro precisa atravessar. Problemas como desperdício, escassez de recursos hídricos e energéticos, aglomerado urbano, congestionamento, crescente demanda no volume de transmissão de dados, entre outros, são algumas das inúmeras questões enfrentadas pelos municípios e que, emergencialmente precisam ser estudadas [11].

De acordo com o elo do crescimento populacional, padrões e estimativas de consumo, a necessidade de alternativas e implementações para evolução e melhorias, aborda o tema em questão, sendo retrata-se a evolução histórica e a comparação, buscou-se também levantar os indicadores que norteiam a temática mundialmente.

Esses indicadores podem ser utilizados como balizadores para o desenvolvimento de um segundo nível de indicadores que possam expressar o grau de inteligência dos municípios através do modelo de cidade inteligente para o contexto brasileiro.

Uma vez contextualizada a condição das cidades brasileiras, identificado o método do Banco Mundial (2002) para alavancar o desenvolvimento socioeconômico dos municípios através de investimentos em infraestrutura de telecomunicações, e observado os indicadores que norteiam o conceito sobre cidades inteligentes mundialmente, foi possível sugerir um modelo de cidade inteligente brasileira, que contextualiza as suas necessidades, mas principalmente aponta para os desafios a serem superados para iniciar a jornada para uma cidade inteligente.

O conceito de cidades inteligentes está cada vez mais humanizado, e questões referentes ao capital humano passam a ser muito valorizadas, juntamente a questões de infraestrutura, economia e investimentos, entretanto, tendo o cidadão como o centro do ecossistema.

Considerando questões evolutivas, como fatores primordiais, a cidade inteligente pode ser definida como o lugar com bons níveis de produtividade, uma vez pode ser definida como que possui uma proporção da população relativamente elevada de pessoas altamente educadas, trabalhos voltados à geração de conhecimento, sistemas de planejamento orientados aos resultados e satisfação da sua população, atividades criativas e iniciativas orientadas para a sustentabilidade [11].

Desta forma, a relação dos tópicos, abordados nesta temática é apresentada no estudo de caso, a fim de informar e contextualizar.

### III. ESTUDO DE CASO – SMART GRID EM CIDADE ISOLADA

O estudo de caso analisado neste trabalho refere-se à uma cidade isolada do SIN, localizada no interior do estado do Amazonas, no Brasil, que contém aproximadamente 16 mil habitantes, e que atualmente possui sua matriz energética 100% poluente, baseada em consumo de combustível fóssil. Na Fig. 3 está a topologia atual do sistema elétrico para a cidade em estudo.

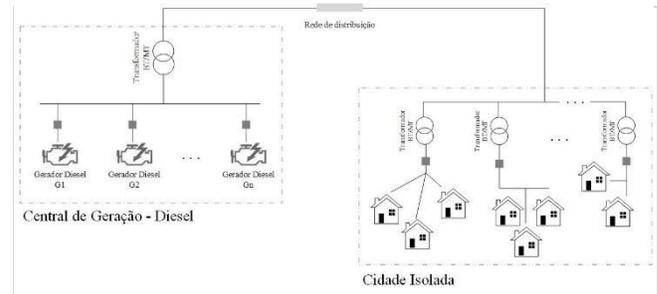


Fig. 3. Topologia do sistema elétrico atual da cidade utilizada para o estudo de caso.

Na Fig. 4 está apresentada a topologia do sistema otimizado proposto para hibridização do sistema isolado deste estudo de caso, a partir da implantação de uma *Smart Grid* com Usina de fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia com Bancos de Baterias.

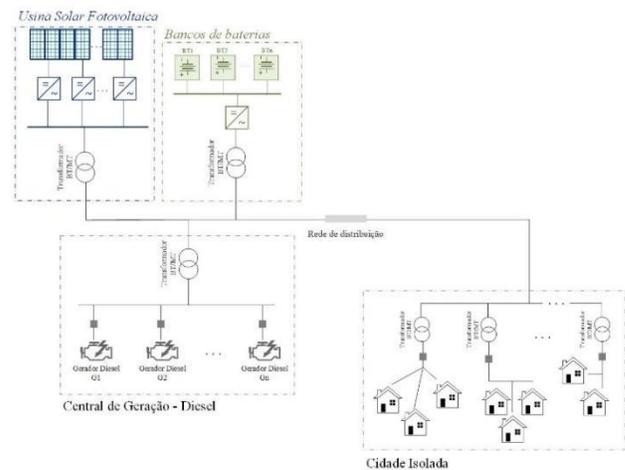


Fig. 4. Topologia do sistema proposto para hibridização do sistema de geração de energia para cidade estudada.

As simulações apresentadas nesse trabalho foram elaboradas no software de simulação HomerPro, de padrão global para otimização de *design* de microrredes e sistemas isolados de todos os setores, com diversos modelos de ativos de geração e armazenamento de energia. Em resumo este aplicativo simula um sistema viável para todas as combinações possíveis dos equipamentos considerados no modelo de projeto, pré-definidos pelo usuário.

Dependendo de como o usuário configura o problema, o HomerPro pode simular centenas ou até milhares de sistemas a fim de encontrar o mais otimizado técnica e economicamente.

Para elaborar o modelo do estudo de caso deste trabalho as premissas presentes na Tabela I foram adotadas. Basicamente, tais premissas referem-se ao custo de implementação das fontes renováveis, energia solar fotovoltaica e armazenamento de energia, bem como o custo do diesel na região do estado do Amazonas.

TABELA I – PREMISSAS DO MODELO IMPLEMENTADO.

Premissas técnicas – estudo de caso		
<b>Tamanho dos geradores</b>	0,41 e 1,01	MW
<b>Quantidade de geradores</b>	3 e 3	unidades
<b>Custo do litro de diesel</b>	5,67	R\$/litro [12]
<b>Custo de implantação da usina solar</b>	3,93	R\$/Wp [13]
<b>Custo de operação do sistema de armazenamento</b>	4,00	R\$/Wh [14]
<b>Eficiência da usina solar</b>	1470	kWh/kWp

A partir da implementação do modelo de *smart grid* no software de simulação, definiu-se a melhor arquitetura de sistema híbrido para o estudo de caso com base nas premissas supracitadas.

#### IV. RESULTADOS E DISCURSÕES

Na Tabela II são apresentadas informações sobre o consumo de energia e de combustível da cidade estudada, em medições da carga do ano de 2022. As emissões de CO<sub>2</sub> e as horas de operação dos geradores são informações preliminares obtidas do modelo do sistema atual implementado no HomerPro.

Inicialmente foi implementado o caso base, que representa a condição do sistema atual, que contém apenas a geração a diesel na matriz elétrica da cidade.

TABELA II – DADOS TÉCNICOS - SISTEMA ATUAL EM ESTUDO.

Informações técnicas – estudo de caso		
<b>Demanda máxima</b>	4.0	MW
<b>Capacidade total geração diesel</b>	5.4	MW
<b>Consumo de energia</b>	22.164,5	MWh/ano
<b>Consumo de combustível</b>	6,02	MM litros /ano
<b>Emissões de CO<sub>2</sub></b>	15.907	ton/ano
<b>Horas de operação de geradores</b>	37.054	Horas/ano

\*Valores simulados, conforme indicativos da cidade utilizada por uma empresa privada.

Quanto ao despacho energético do sistema atual, nota-se que o perfil de carga estudado apresenta um consumo intenso durante a noite e a madrugada, característica de cargas residenciais da cidade. O despacho dos geradores no *software* de simulação ocorre de forma a otimizar as horas de operação de cada máquina e visa atender a carga sem interrupções.

Na Fig. 5 está apresentado perfil de carga simulado e o despacho energético de um dia de simulação para o estudo de caso. Nota-se que ao longo do dia ocorrem vários acionamentos de geradores, representados pelas curvas em tons de vermelhos e laranjados, sendo que a potência de geração de cada gerador é definida pela demanda instantânea da carga.

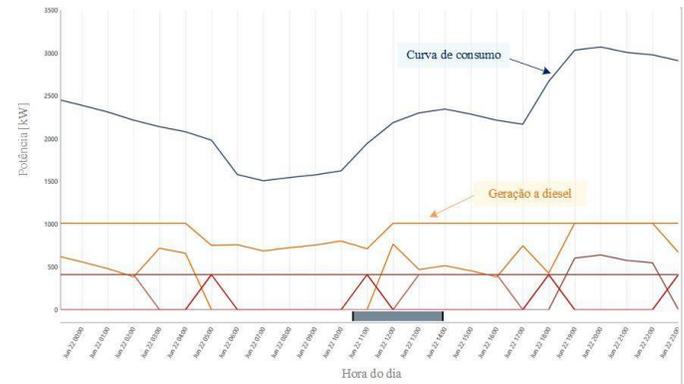


Fig. 5. Despacho energético diário do sistema atual.

Na Fig. 6 está apresentado o perfil de carga simulado e o despacho energético anual para o estudo de caso. É possível observar que a curva de consumo segue o mesmo patamar de carga ao longo do ano com uma leve sazonalidade e incremento de carga nos meses de setembro a novembro. Para atender a essa demanda sazonal o uso dos geradores nesta época do ano é mais intenso quando comparado com os demais meses do ano.

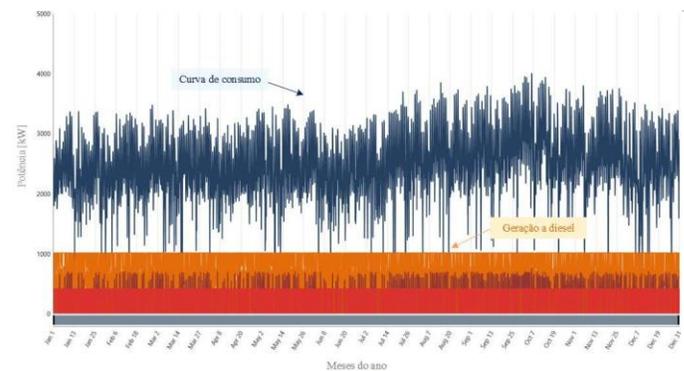


Fig. 6. Despacho energético anual do sistema atual.

Com relação às emissões, em uma projeção de quinze anos, considerando um crescimento populacional de 0.5% ao ano, a emissão de CO<sub>2</sub> estimada para este sistema totaliza em torno de 247 mil toneladas acumuladas ao final de 2036. Na Fig. 7 está apresentada a projeção anual das emissões de CO<sub>2</sub> para este sistema.

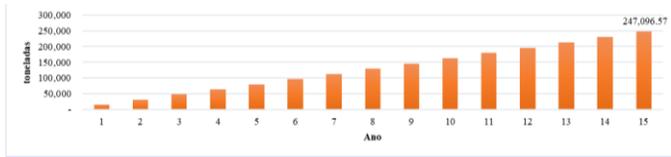


Fig. 7. Estimativa de emissão anual de CO<sub>2</sub> - Acumulado (projeção 2036) – sistema atual.

O problema deste trabalho de caso foi implementado em HomerPro com objetivo de determinar a arquitetura de sistema mais otimizado em termos técnico-financeiros para hibridização da usina de geração a diesel e consequentemente redução do consumo de combustível fóssil e das emissões de gases poluentes na atmosfera.

O modelo foi implementado com base nas premissas da Tabela II e o sistema otimizado, ou seja, aquele que resulta em menor LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) para a hibridização da cidade em estudo cujos os resultados são apresentados na Tabela III.

TABELA III – RESULTADOS TÉCNICOS – SISTEMA HÍBRIDO.

Informações técnicas – estudo de caso		
Demanda máxima	4.0	MW
Capacidade total geração diesel	5.4	MW
Consumo de energia	22.164,5	MWh/ano
Potência Usina solar	6.5	MWp
Capacidade Banco de Baterias	3.65	MWh
Geração renovável (GR)	7.136,9	MWh/ano
% GR da carga	32	%
Consumo de combustível	4.12	MM litros /ano
Emissões de CO <sub>2</sub>	10.904	ton/ano
Horas de operação de geradores	27.233	Horas/ano

Com o sistema implementado observou-se uma redução de aproximadamente 31% no consumo anual de combustível e consequentemente nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera a partir da implantação de uma *smart grid* com energia limpa e renovável para hibridização da usina de geração diesel.

Também possível observar que as horas de operação dos geradores são reduzidas em aproximadamente 10 mil horas por ano, o que foram reduzidas os custos com manutenção e operação das máquinas. Nas Figuras. 8 e 9 pode ser observado essa redução, visto que, no período de 6 e 18 horas, a demanda da cidade é suprida unicamente pela geração solar com armazenamento de energia, sendo possível o desligamento de todos os geradores em boa parte do dia.

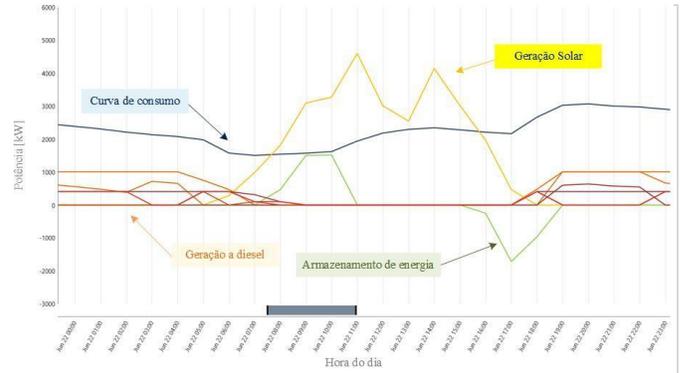


Fig. 8. Despacho energético diário do sistema com *smart grid*.

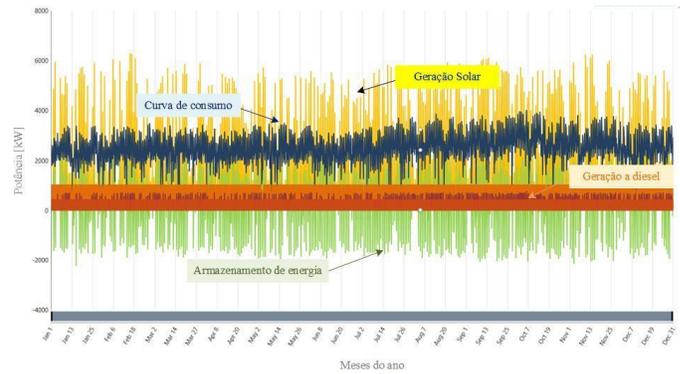


Fig. 9. Despacho energético anual do sistema atual.

Em uma projeção de quinze anos, considerando um crescimento populacional de 0,5% ao ano, a emissão de CO<sub>2</sub> estimada para o sistema híbrido totaliza aproximadamente 173 mil toneladas ao final de 2036, ou seja, uma redução de 30% de emissões comparada à projeção para o sistema atual. Na Fig. 10 está apresentada a projeção anual das emissões de CO<sub>2</sub> para este sistema.

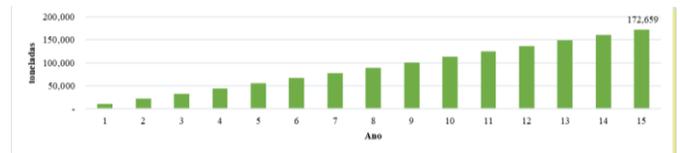


Fig. 10. Estimativa de emissão anual de CO<sub>2</sub> - Acumulado (projeção 2036) – sistema híbrido.

A título de comparação, na Fig. 11 estão apresentados os perfis de emissões de CO<sub>2</sub> acumulado para ambos os cenários: sistema atual e sistema híbrido. Nota-se que a projeção de aumento de carga anual é acompanhada da elevação das emissões acumuladas.



Fig. 11. Comparação de emissão de CO<sub>2</sub> acumulado- Anual.

## V. CONCLUSÕES

A redução de emissões de CO<sub>2</sub> com a utilização de energia renovável em sistemas isolados é viável e benéfica. A introdução de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidrelétrica, em cidades que dependem principalmente de combustíveis fósseis para a geração de energia, pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>.

Cidades isoladas geralmente têm desafios logísticos e custos mais altos para o transporte de combustíveis fósseis, tornando as fontes renováveis uma opção atraente. Além disso, a implantação das *smart grids* pode trazer benefícios adicionais, como a redução da dependência de fontes externas de energia, o aumento da resiliência energética e a criação de oportunidades econômicas locais.

Neste trabalho foi realizado um estudo acerca da aplicação dos conceitos de *smart grids* e cidades inteligentes, relacionados ao desafio de descarbonização dos sistemas isolados do Brasil. A partir de um estudo de caso apresentado observou-se que com a hibridização da matriz energética de uma cidade isolada é possível reduzir em pelo menos 31% das emissões anuais de CO<sub>2</sub>, reduzindo a pegada de carbono da geração de energia elétrica das cidades.

Além da redução da pegada de carbono, outros impactos positivos podem ser observados quando da implantação das *smart grids* em sistemas isolados. Também se observa uma redução nas horas de operação dos geradores o que pode reduzir significativamente os custos com operação e manutenção desses sistemas, tornando a energia mais limpa e de menor custo aos consumidores.

No entanto, é importante considerar as peculiaridades de cada região isolada ao planejar a transição para energia renovável. Fatores como disponibilidade de recursos renováveis, custos de implantação, necessidades de armazenamento de energia e integração com a infraestrutura existente devem ser cuidadosamente avaliados para garantir o sucesso da transição e maximizar os benefícios ambientais.

Os sistemas de armazenamento desempenham um papel crucial na integração eficiente e confiável de sistemas renováveis em cidades inteligentes. À medida que mais cidades buscam fontes de energia limpa e sustentável, a necessidade de armazenar energia renovável se torna cada vez mais importante.

Os sistemas renováveis, como energia solar e eólica, são intermitentes por natureza, o que significa que a geração de energia varia de acordo com as condições climáticas. Isso pode resultar em flutuações na oferta de energia, criando desafios para o fornecimento de energia estável e contínuo. Os sistemas de armazenamento, como baterias e tecnologias de armazenamento térmico, permitem que o excesso de energia gerada pelos sistemas renováveis seja armazenado e utilizado quando a demanda é maior do que a geração atual. Isso ajuda a

equilibrar a oferta e a demanda de energia, tornando os sistemas renováveis mais confiáveis e eficientes.

A combinação de sistemas renováveis, sistemas de armazenamento e cidades inteligentes cria uma sinergia poderosa. As cidades inteligentes podem aproveitar a infraestrutura de comunicação e monitoramento para otimizar a utilização de energia renovável e armazenamento, reduzindo custos, aumentando a resiliência energética e minimizando significativamente as emissões de carbono.

## VI. REFERÊNCIAS

- DEDES, Ioannis-Christos et al. Energy storage in smart electrical grids. In: **2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)**. IEEE, 2021. p. 1-4.
- FENG, Yawen; LIAO, Han-Teng; BU, Mengyi. Responsible Decarbonization for Smart Cities: A People-Centered Agenda. In: **2022 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)**. IEEE, 2022. p. 202-207.
- SISTEMAS ISOLADOS: Mais renovável, menos diesel. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/especiais/53246317/sistemas-isolados-mais-renovaveis-e-menos-diesel>. Acesso em: 10 maio 2023.
- BAYINDIR, Ramazan et al. Smart grid technologies and applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 66, p. 499-516, 2016.
- ROUHOLAMINI, Mahdi et al. A review of modeling, management, and applications of grid-connected Li-ion battery storage systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 13, n. 6, p. 4505-4524, 2022.
- BONFIM, Victor Rodrigues Borges. Gestão e operação de sistemas isolados brasileiros. 2012.
- Matriz Energética e Elétrica – Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>.
- Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2023-2027 Ciclo 2022, Empresa de Pesquisa Energética, EPE, Rio de Janeiro, dezembro de 2022.
- DE SOUZA, Cecy Meira Rosa; GALLO, Fabrício. A reestruturação do setor elétrico brasileiro: Sistema Interligado Nacional e a energia elétrica como mercadoria.
- Falcão, D. M. Smart grids e microredes: o futuro já é presente. **Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos**, v. 8, 2009.
- Jordão, K. C. P. Cidades inteligentes: uma proposta viabilizadora para a transformação das cidades brasileiras. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2016.
- Formação de Preço do Diesel – AM. Preços Petrobras. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/w/diesel/am>. Acesso em: 16 de maio de 2023.
- Strategic Research Report - Distributed Generation Photovoltaic (PV) Market. Greener, Agosto 2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-grandes-usinas-solares-2023/>. Acesso em 16 de maio de 2023.
- Estudo Estratégico – Mercado de Armazenamento. Aplicações, Tecnologias e Análises Financeiras. Greener, Agosto 2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-grandes-usinas-solares-2023/>. Acesso em 16 de maio de 2023.

## VII. BIOGRAFIAS



**Patrícia Poloni.** Possui graduação em Engenharia Elétrica, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2017), especialização na área de gestão de projetos (2020), mestrado pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2020). Profissional experiente, especializado em Sistemas de Energia, com forte histórico na liderança de projetos de energia renovável e sistemas de armazenamento de energia. Experiência abrangente em todas as etapas do ciclo de vida do projeto, desde a concepção até a operacionalização, incluindo

desenvolvimento de propostas técnicas, execução detalhada do projeto e gerenciamento eficiente de processos de estudos elétricos. Reconhecido por habilidades avançadas de simulação, implementação de microrredes e otimização de ativos de geração. Demonstra sólida coordenação com concessionárias de energia e agências reguladoras do setor.



**Renata Ortiz Silva.** Possui graduação em Engenharia Elétrica - Ênfase em Geração, Transmissão e Distribuição de Energia pelo Centro Universitário Sagrado Coração de Jesus (2020). Atualmente é engenheira pesquisadora, com experiência nas seguintes áreas: sistemas elétricos de potência, transmissão e distribuição de energia



**André Luiz Veiga Gimenes.** Professor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Coordenador do GEPEA USP - Grupo de Energia do PEA EPUSP. Possui graduação em Engenharia de Energia e Automação Elétricas pela Universidade de São Paulo (1997), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2004). Realiza pesquisas na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento Energético e Gestão de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: energia solar, planejamento energético, energia elétrica, planejamento integrado de recursos, desenvolvimento sustentável e gestão energética. É membro do IEEE - Power & Energy Society (PES).

**Miguel Edgar Morales Udaeta.** Possui graduação em Engenharia Elétrica - Facultad de Ciencias y Tecnologia, Universidad Mayor de San Simón (1984) - , mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP (1990), doutorado em Engenharia Elétrica pela EPUSP (1997), pós-doutorado em planejamento energético e planejamento integrado de recursos pela USP (1999 e 2003), e, livre-docência pela EPUSP (2012). Atualmente é professor de pós-graduação e pesquisador no GEPEA/EPUSP (Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Possui experiência na área de Engenharia de Energia e Economia de Energia, com ênfase em Planejamento Integrado de Recursos, Cadeia Produtiva do Gás Natural, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, atuando principalmente nos seguintes temas: energia, planejamento energético, desenvolvimento sustentável, análise integrado de recursos, recursos energéticos, energização rural e energia e meio ambiente.