



Empresa de Pesquisa Energética



INICIATIVAS NAS CIDADES PARA O USO INTELIGENTE DA ENERGIA

O papel das cidades no uso da energia.



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA





GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME

Ministério de Minas e Energia
Ministro
Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

Secretária Executiva
Marisete Fátima Dadald Pereira

**Secretário de Planejamento e
Desenvolvimento Energético**
Paulo Cesar Magalhaes Domingues

Secretário de Energia Elétrica
Christiano Vieira da Silva

**Secretário de Petróleo, Gás Natural e
Combustíveis Renováveis**
Rafael Bastos da Silva

**Secretária de Geologia, Mineração e
Transformação Mineral**
Pedro Paulo Dias Mesquita



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente
Thiago Vasconcellos Barral Ferreira
Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais
Giovani Vitoria Machado
Diretor de Estudos de Energia Elétrica
Erik Eduardo Rego
Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível
Heloísa Borges Esteves
Diretor de Gestão Corporativa
Angela Regina Livino de Carvalho

URL: www.epe.gov.br

Sede
Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - Ministério de Minas e
Energia - Sala 744 - 7º andar - 70065-900 - Brasília - DF
Escritório Central
Praça Pio X, 54
20091-040 - Rio de Janeiro - RJ

Informe Técnico

Iniciativas nas cidades para o uso inteligente da energia

Série: “O papel das cidades no uso da
energia”

Superintendente

Carla da Costa Lopes Achão

Equipe Técnica

Flávio Raposo de Almeida
Gustavo Naciff de Andrade
Natália Gonçalves de Moraes

Nº IT-EPE-DEA-SEE-001/2022

19 de Abril de 2022

1. O uso da energia nas Cidades Inteligentes

O uso da energia na sociedade moderna se dá prioritariamente no ambiente urbano, onde estão concentrados 64% do seu consumo e cerca de 70% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associados ao seu uso (IEA, 2016). De fato, mais da metade da população mundial reside em cidades, o que propicia um ambiente de maior interação entre diversos atores sociais a fim de construir soluções que os permitam viver de forma mais eficiente e organizada. Dentre as oportunidades que os centros urbanos podem propiciar, destaca-se a possibilidade de obter melhor educação, recursos e serviços do que o campo pode oferecer para desenvolver os seus indivíduos (Glaeser, 2011), mesmo com a recente expansão das redes de comunicação e mídias digitais para cidades menores e áreas rurais.

A energia é uma componente fundamental nesse processo e se destaca pelas diferentes formas como as pessoas podem utilizá-la no dia a dia das cidades para diversas finalidades. No entanto, os desafios de adequação do seu uso têm sido colocados ao longo do tempo, seja pela escassez de fornecimento (via oferta) ou pelo crescimento paulatino da demanda nos núcleos urbanos. Algumas práticas de economia de energia buscaram equacionar o seu uso, tais como medidas e programas de eficiência energética que despontaram sobretudo a partir da década de 1970, em função de crises do petróleo. Posteriormente, novas abordagens passaram a contribuir para a racionalização do uso da energia com implementação de processos baseados na economia circular, por exemplo.

O uso da energia necessariamente passa pela atuação das cidades como o principal *driver* no processo de transição energética da sociedade. A busca por ganho de eficiência nos serviços urbanos, qualidade de vida da população e o desenvolvimento urbano sustentável, descritos por Ascimer (2015) como os principais objetivos de uma cidade inteligente, representa o contínuo desenvolvimento dos próprios indivíduos no ambiente urbano. A forma como se usa a energia deve acompanhar e, por vezes, até antecipar esse processo a fim de viabilizá-lo. Sob o prisma do consumo de energia é importante que as discussões sobre cidades inteligentes sejam feitas levando em consideração questões pertinentes ao contexto de transição energética como as mudanças climáticas e os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2021).

A coordenação desse processo por parte dos governos locais exige uma transformação no processo de governança, visando à utilização de tecnologia para potencializar a participação política, serviços aos cidadãos e o funcionamento da administração, o que é denominado por Giffinger et al. (2007) como “Smart Governance” – uma das seis características de uma cidade inteligente, conforme apontado no primeiro informe técnico dessa série (EPE, 2020^b).

Atualmente, o desafio de transição do sistema energético para uma economia de baixo carbono passa a adicionar diversos aspectos muito presentes no ambiente urbano. Dentre eles, a economia circular, a eficiência energética nas edificações, o uso de recursos energéticos distribuídos (RED) e a adaptação da mobilidade urbana despontam como algumas das principais formas de promoção da inteligência no uso da energia nas cidades. Deve-se reconhecer que em uma “cidade inteligente” a adoção de tecnologia deve tornar as cidades mais sustentáveis, melhorando a qualidade de vida de sua população.

1.1. Governança e Inovação

Um dos principais desafios dos governos municipais na condução do processo de mudança, além dos ciclos políticos, é a estrutura burocrática e a dificuldade de implementar a inovação em si, que envolvam pessoas, estrutura e estratégia, além das restrições orçamentárias e da própria aversão ao risco inerente ao setor público. Assim, a aproximação entre o ente público e o privado, a academia, o terceiro setor e os demais segmentos da sociedade mostra-se primordial tanto na identificação de demandas, quanto na implementação de soluções as quais impactam crescentemente na forma de consumir e produzir energia nas cidades.

A criação de laboratórios de inovação ligados aos órgãos de governos e, em especial, às prefeituras está alinhada a este objetivo de integração de atores diversos da sociedade. Um exemplo é o Mobilab, promovido pela prefeitura de São Paulo e que aponta as *startups* capazes de produzir soluções inovadoras para os problemas da cidade, prevendo uma forma alternativa de remuneração/contratação da solução vencedora, por meio do concurso de projetos. No âmbito do governo federal, foi criada a plataforma Rede de Inovação no Setor Público (InovaGov), com seu laboratório chamado GNova Lab com o intuito de aproximar os diferentes laboratórios de inovação em governo espalhados pelo Brasil.

É neste contexto também que se encontram as govtechs (que unem governos e tecnologia), atores cada vez mais importantes no processo de transformação digital e na implementação de soluções tecnológicas inovadoras nos serviços públicos. Diversas govtechs impactam a forma de se locomover, de recolher resíduos ou iluminar as cidades, trazendo impactos relevantes para o setor de energia. Como exemplo de *startup* govtech pode-se citar a Atman Systems, que é um provedor de tecnologia que desenvolve soluções para cidades inteligentes com produtos e serviços na gestão de tráfego, controle de tráfego e implementação de sistemas de energia solar. Outro exemplo é a Bright Cities, uma plataforma de diagnóstico de cidades, exclusiva para gestão pública que visa a aceleração da utilização de soluções inteligentes de referência.

Cabe ainda destacar exemplos de projetos de cidades que atuam de forma a viabilizar a inovação e difundir tecnologias localmente através de uma diversidade de atores, com impactos também na temática energética, como pode ser observado na **Tabela 1**. Nela são apresentados os projetos: 1) Green Sampa (São Paulo) lançado em 2019, 2) Porto Digital (Recife) que teve início em 2000, e 3) Living Lab (Foz de Iguaçu), inaugurado em 2019.

Tabela 1: Exemplos de projetos de governos locais voltados para inovação

| Projeto / Atores | Atuação/ Objetivos | Características |
|--|--|---|
| Green Sampa (São Paulo) /Prefeitura de São Paulo por meio de sua agência de desenvolvimento, Ade Sampa, apoio do Banco Mundial e Programa Cidades Sustentáveis | Através da gestão de dados e informações são identificadas as demandas de empresas privadas e do setor público e realizado o cruzamento com as soluções inovadoras de <i>startups</i> verdes, como aquelas que atuam em energias limpas e armazenamento energético, indústria limpa e logística reversa e mobilidade urbana. | A plataforma realiza o mapeamento de atores locais, acompanhamento e desenvolvimento de <i>startups</i> verdes com desafios de problemáticas da cidade, <i>meetups</i> para integração do setor e qualificação no eixo da sustentabilidade. |

| | | |
|--|--|--|
| <p>Porto Digital (Pernambuco) /Governo do Estado de Pernambuco, Núcleo de Gestão do Porto Digital (NGPD), qualificada como Organização Social (OS) e Prefeitura de Recife.</p> | <p>Através do parque tecnológico atua em dois eixos temáticos principais: tecnologia da Informação e comunicação (TIC) e economia criativa (EC). Dentro desses eixos, as áreas de atuação das empresas inseridas em seu ambiente incluem inteligência artificial, redes neurais e mobilidade urbana.</p> | <p>Sua estrutura física abriga cerca de 300 empresas e instituições dos setores de (TIC, Economia Criativa (EC) e Tecnologias Para Cidades. O parque conta com incubadoras de empresas, aceleradoras de negócios, institutos de pesquisa de desenvolvimento e organizações de serviços associados, além de diversas representações governamentais.</p> |
| <p>Living Lab (Foz de Iguaçu) /Prefeitura de Foz de Iguaçu, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e Parque Tecnológico de Itaipu</p> | <p>Através de um ambiente de pesquisa, proporciona a validação de tecnologias para cidades inteligentes como: rede de iluminação pública inteligente (ILP), sistema de identificação facial e reconhecimento de padrões, sala de comando e controle que integram compartilhamento de veículos elétricos e bicicletas e medidores de água e energia inteligentes.</p> | <p>Os <i>living labs</i> são montados a partir de parcerias e convênios com centros de pesquisas, institutos de tecnologias, academia, iniciativa privada e governos federal e subnacionais. O Living Lab de Cidades Inteligentes realiza testes focados em três pilares: usabilidade, interoperabilidade e cybersegurança.</p> |

Fonte: Elaboração própria

A partir do que foi exposto, verifica-se que crescentemente as soluções para a ampliação da infraestrutura das cidades, incluindo a energética, serão implementadas e viabilizadas através de uma multiplicidade de atores que precisam ser conectados através de uma governança moderna voltada para inovação. Por outro lado, diversos serviços e soluções que tornam as cidades mais eficientes, inclusive no que se refere ao consumo de energia, surgem e são viabilizados de forma descentralizada por agentes pulverizados na sociedade, como as *startups*. Ademais, o montante de investimentos necessário nas cidades que possibilita a transição energética e novas soluções de baixo carbono alinhados com a crescente digitalização exigem parcerias e modelos de negócio multiatores.

Por isso, para se compreender as tendências do consumo de energia no âmbito das cidades inteligentes e sustentáveis, faz-se necessário compreender esta nova dinâmica de governança e inovação.

1.2. A energia no ambiente urbano

Atualmente, o desafio de transição do sistema energético para uma economia de baixo carbono passa a adicionar alguns aspectos que se destacam no ambiente urbano, tais como:

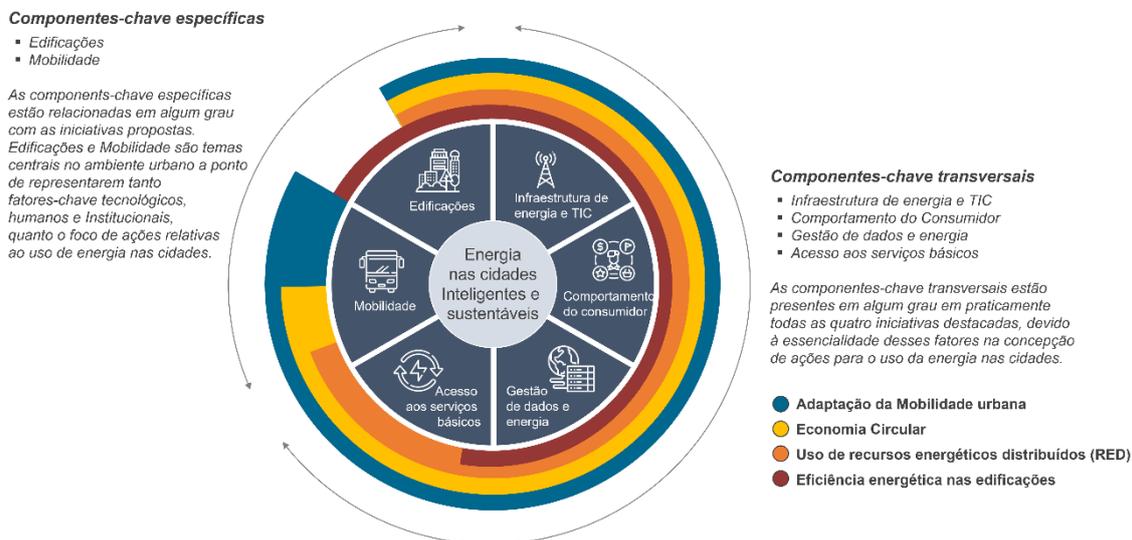
- A. economia circular;
- B. eficiência energética nas edificações;¹
- C. uso de recursos energéticos distribuídos (RED) e
- D. adaptação da mobilidade urbana

Esses aspectos despontam como algumas das principais formas de promoção da inteligência no uso da energia nas cidades, conforme destacado no informe técnico anterior (EPE, 2020^b). Esses aspectos são denominados como “iniciativas” na taxonomia adotada nessa série de estudos

¹ Embora a eficiência energética nas edificações seja abrangida pelo conceito de Recursos Energéticos Distribuídos, dado a relevância do tema sobre a ótima do consumo de energia nas cidades, optou-se por explicitar este tema para análise.

sobre o papel das cidades no uso da energia. Tais iniciativas estão relacionadas às componentes-chave da energia nas cidades inteligentes, já previamente identificadas no informe técnico anterior (EPE, 2020^b), e ilustradas na Figura 1.

Figura 1: Característica da Edificação eficiente em interação com a rede elétrica



Fonte: Elaboração própria.

1.3. A infraestrutura energética

Os sistemas de infraestrutura de energia são um elemento central de pacotes econômicos que visam ao estímulo ao desenvolvimento e à recuperação das economias em bases sustentáveis. De acordo com o relatório *International good practice principles for sustainable infrastructure* (ONU, 2021), investir em infraestrutura resiliente em países em desenvolvimento pode criar um retorno de US\$4 para cada US\$1 investido, possibilitando ganhos de produtividade na economia.

Por outro lado, a infraestrutura de energia pode, eventualmente, causar impactos negativos ao meio ambiente, agravar desigualdades sociais e repercutir em desequilíbrios nas finanças públicas que podem durar por décadas. Isso é particularmente importante tendo em vista a escala de investimento em infraestrutura energética que é esperada nas próximas décadas. Por isso, o planejamento e o desenvolvimento da infraestrutura devem ser baseados em uma boa compreensão das necessidades dos serviços de infraestrutura e considerar as diversas opções disponíveis para atender a essas necessidades.

Nas cidades, os sistemas de infraestrutura de energia são fisicamente conectados a sistemas nacionais ou regionais e contam com eles para a maior parte de seu suprimento e gerenciamento. Os governos nacionais normalmente são vistos como os principais órgãos responsáveis por gerir o fornecimento e infraestrutura de energia incluindo conduzir a transição para uma economia baseada em baixo carbono. Nas últimas décadas, no entanto, observa-se que a dinâmica desta relação entre a infraestrutura nacional e local vem mudando com a tendência de descentralização da produção de energia elétrica, inserção de tecnologias digitais e novos modelos de negócio, de forma que os usuários finais e os governos municipais têm apresentado papel crescente na implementação de infraestrutura energética.

A implementação de infraestrutura e tecnologias no âmbito local deve considerar características tais como geografia, contextos ambientais, distribuição de renda, infraestrutura pré-existente, questões sociais, segurança pública e capacidade institucional. A disponibilidade de bases estatísticas locais de qualidade confere um papel crucial neste diagnóstico.

Expandir a infraestrutura e modernizar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis a preços acessíveis, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis e modernas na matriz energética e aumentar a eficiência energética estão entre as metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU. Em linha com estes objetivos, a infraestrutura das tecnologias digitais tem o potencial de acelerar a mitigação das mudanças climáticas, aumentar a estabilidade e segurança da oferta de energia e a redução de custos associados ao sistema energético.

Há várias tecnologias viabilizadoras (que podem ser equipamentos, máquinas, técnicas ou métodos) que utilizam recursos digitais para resolver determinados desafios no setor de energia. De fato, o aumento da complexidade trazida pela descentralização do sistema elétrico, aliado ao aumento da eletrificação da economia (incluindo a mobilidade urbana) reforça a necessidade de uma crescente digitalização². A inserção de energias renováveis eólica e solar no sistema elétrico fornece uma enorme quantidade de dados através de tecnologia de sensores que podem produzir previsões precisas de geração de energia com uso de IA e Big Data³. Este tipo de aplicação vem sendo transformada em novos negócios em diversos países e no âmbito de cidades. Além disso, crescentemente as tecnologias digitais adequadas possibilitam que consumidores participem mais ativamente do sistema energético, dos serviços de mobilidade urbana e das cadeias de economia circular.

Ao longo de cada uma das iniciativas dos capítulos a seguir são apresentados exemplos de tecnologias e infraestrutura com suas respectivas aplicações relacionadas ao uso de energia nas cidades.

² No tocante ao uso da energia, conforme demonstrado durante a crise do COVID-19, a infraestrutura de TIC já permite a realização do trabalho à distância para muitas categorias profissionais. O ambiente de trabalho virtual pode alterar os custos institucionais e a mobilidade, desde os congestionamentos diários até as viagens a negócios, com chances de reduzir a densidade urbana das megalópoles e, com isso, contribuir para o conceito de descentralização da produção e uso da energia. Além disso, sob uma perspectiva mais ampla digitalização dos sistemas de energia com maior número de sensores, traz oportunidades e potenciais enormes de incremento na eficiência desses sistemas.

³ A gestão dos dados será uma ferramenta cada vez mais fundamental para os estudos de planejamento, havendo grandes oportunidades de aperfeiçoamento. Um exemplo de aprimoramento necessário é a maior disponibilidade de dados de geração bruta das instalações de energia solar de MMGD. Hoje, apenas a geração líquida é conhecida pelas distribuidoras, considerando o tipo de medidor exigido pela Resolução ANEEL 482/2012. A estruturação de bases de dados com essas informações, em um contexto de crescente descentralização, pode trazer importantes insumos para o planejamento dos sistemas elétricos.

2. Economia circular e sistemas energéticos

No início dos anos 90, os economistas ambientais Pearce e Turner criaram o termo “*circular economy*” para explicar a viabilidade de levar em consideração a conscientização ambiental nos fluxos econômicos, fechando os *loops* industriais (Geissdoerfer, 2017). Apesar disso, o termo economia circular não é atribuído a um só autor ou escola de pensamento e, sim, visto como um conceito em desenvolvimento através de diferentes abordagens e disciplinas como ecologia, economia, engenharia, arquitetura, *design* e negócios.

A Economia Circular passou a ganhar representatividade com o apoio de instituições como a Fundação Ellen MacArthur, que iniciaram programas e parcerias com organizações públicas e privadas para acelerar a transição da economia linear para o modelo circular. Segundo esta instituição, a economia circular é restauradora e regenerativa por definição e visa manter produtos, componentes e materiais em sua maior utilidade e valor em todos os momentos. (EMF, 2015).

O modelo de economia circular vem sendo considerado um dos pilares para se atenuar problemas relacionados à segurança do suprimento de energia, mudanças do clima, escassez de materiais, dependência de importação e geração de resíduos, pois em última análise visa dissociar o desenvolvimento econômico global do consumo de recursos finitos. Este é um dos motivos pelo qual a economia circular ganhou impulso nos pacotes de reativação das economias no contexto pós pandemia, seguindo padrões de implementação diferenciados a depender do país.

Alguns países seguem uma abordagem que pode ser caracterizada como descendente (*top-down*), fazendo uso de instrumentos de comando e controle, como na China. Outros países recorrem a uma política ascendente (*bottom-up*) com foco em instrumentos e mecanismos de mercado e envolvimento diversificado entre organismos ambientais, sociedade civil e organizações não governamentais (ONG). Neste caso, os atores demandam produtos com menor impacto no meio ambiente e a legislação contempla o envolvimento tanto de atores públicos, quanto de empresas privadas e da indústria, a exemplo de Europa e Japão (Ghisellini *et al.*, 2016).

Na Europa, a implementação do Plano de Ação de Economia Circular lançado em 2015 enfatiza a importância do gerenciamento eficiente dos resíduos sólidos urbanos para, por exemplo, aumentar os percentuais de reciclagem e os projetos *waste-to-energy*. No que tange aos aspectos de *design* circular e processos de produção, merecem ênfase as medidas de concepção ecológica e de etiquetagem energética para vários produtos que agora incluem regras sobre requisitos de eficiência do material, como disponibilidade de peças de reposição, facilidade de reparo e facilitação do tratamento no final da vida útil (EC, 2019).

No sistema energético, a economia circular pode trazer soluções que maximizem o uso eficiente de recursos naturais para produção de energia e seu uso final. Ela pode ocorrer, por exemplo, através da reciclagem de reuso de infraestrutura de produção/geração de energia; aproveitamento de resíduos para geração de energia; e cooperação entre indústrias e empresas e/ou outros atores (Box 1). A economia circular requer novos modelos de negócio que possibilitem a descentralização por meio da modularidade, compartilhamento e/ou a conectividade dos produtos que frequentemente são transformados em serviços e, por conseguinte, o consumidor em usuário.

A combinação do conceito de economia circular com tecnologias digitais, como as redes móveis de alta velocidade, IoT, IA e Blockchain possibilita que maior inteligência possa ser injetada na

cadeia de valor por meio de soluções baseados em dados, que são usados para suportar maior rastreabilidade e transparência no uso de produtos, no fluxo de materiais e na gestão de resíduos por exemplo.

Assim, a economia circular vem sendo incorporada à estratégia de negócio de diversas empresas de energia. Segundo a Enel X, uma empresa global com base em energia, a transição atual de um modelo linear para uma economia circular representa uma oportunidade para inovação sustentável (ver exemplo no Box 1). Na CPFL, o desenvolvimento do modelo de economia circular possibilitou que a companhia transformasse cerca de 250 toneladas de resíduos gerados por mês pelas suas distribuidoras em São Paulo em um negócio rentável. Segundo a empresa, de 2017 a 2019, o processo gerou R\$ 146 milhões em receita e 200 empregos diretos, além de contribuir para o controle da poluição e a redução do uso de recursos naturais (CPFL, 2020).

Box 1: Economia circular na infraestrutura de produção e geração de energia

Na etapa da produção de petróleo e gás ou geração de energia elétrica considera-se o *design* de ativos ou serviços no qual se planeja a reciclabilidade de materiais nas plantas de produção de energia e nas redes de distribuição. Ao final da vida útil da planta, parte da infraestrutura e dos materiais pode ser utilizada como insumo em novos projetos, como energéticos em processos diversos, ou como parte do processo de logística reversa.

A Trina Solar, uma das maiores fabricantes mundiais de painéis solares, começou a desenvolver tecnologias e padrões para a reciclagem no final de uso dos módulos fotovoltaicos em antecipação à obsolescência dos painéis de primeira geração. A operação de coleta dos materiais recicláveis estará localizada principalmente em países de uso final. No Brasil, a empresa SunR realiza serviço semelhante, realizando a coleta dos módulos fotovoltaicos danificados, por meio de parceria com estados brasileiros, e selecionando os materiais recicláveis para que possam ser inseridos na cadeia produtiva novamente.

A reciclagem dos painéis possibilita que o vidro extraído dos módulos possa ser usado para outras aplicações de vidro, enquanto os sistemas de controle eletrônico, por exemplo podem ser tratados como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Essa prática permite ganhos econômicos com o valor do material secundário, redução de descartes de resíduos, de consumo energético e impactos ambientais (EMF, 2015).

O descomissionamento de 23 usinas termelétricas pela italiana ENEL, devido à redução de demanda e aumento da geração descentralizada, levou à empresa a estabelecer o Futur-E, um programa público-privado que usa concursos públicos e concursos de ideias para identificar a longo prazo, soluções de remodelação para as antigas plantas. Um dos projetos finalizados foi a transformação da antiga usina de óleo combustível em Augusta (Sicília) em uma usina de gaseificação de biomassa de 900 kW alimentada a partir de biomassa local (ENEL,2020).

Destacam-se ainda, as iniciativas voltadas à economia circular no desenvolvimento de fontes mais limpas de energia a partir de resíduos orgânicos e no uso da biomassa. O aproveitamento de resíduos (biomassa, produtos vegetais ou animais), por exemplo, possibilita a redução da sua provável queima em aterros sanitários e seu aproveitamento para diversos fins energéticos (Box 2). As cadeias de produção sucroalcooleiras e de biodiesel também incorporam frequentemente a circularidade de processos. A Raízen, por exemplo, utiliza os subprodutos da cana para a produção de biogás, produção de etanol de 2ª geração, geração de energia elétrica e, ainda, como insumo para fertilizantes, colaborando para uma nova colheita, e assim, fechando o ciclo (RAÍZEN, 2020).

Box 2: O aproveitamento do Biogás

O aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica, energia térmica e biometano vem ganhando espaço no mundo. No Brasil, contabiliza-se 548 plantas de biogás, sendo que destas, 521 encontram-se em operação para fins energéticos, produzindo um total de 1,3 bilhões de m³/ano, segundo levantamento realizado em 2019 (CIBlogas, 2020).

As plantas que têm como origem de substrato os resíduos sólidos urbanos (RSU) ou efluentes de estações de tratamento de esgoto (8% das plantas em operação) são responsáveis por 76% do biogás produzido no país. Já aquelas que têm como principal origem de substrato a agropecuária (80% das plantas em operação) são responsáveis por apenas 12% do volume produzido. As demais plantas têm como origem de substrato, a indústria. Na Tabela 1, a seguir observa-se que, a principal aplicação energética do biogás é a geração elétrica com 84% das plantas, consumindo 86% do volume de biogás produzido. O volume restante destina-se à energia térmica, GNR/Biometano e à energia mecânica.

Classificação por aplicação energética do biogás das plantas em operação no Brasil em 2019

| Principal aplicação energética do biogás | Quantidade de plantas | | Volume de biogás (Nm ³ /ano) | |
|--|-----------------------|-----|---|-----|
| Energia elétrica | 439 | 84% | 1.168.138.811 | 86% |
| Energia térmica | 70 | 14% | 132.094.572 | 10% |
| GNR/Biometano | 6 | 1% | 37.739.175 | 3% |
| Energia mecânica | 6 | 1% | 7.526.112 | 1% |
| Total | 521 | | 1.345.498.670 | |

Fonte: CIBlogas, 2020/Biogás Brasil, 2021.

Regulamentações recentes apresentam estímulos para a produção de biometano, como é o caso do Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022, que institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Dentre os objetivos deste decreto, está a promoção do mercado de carbono, em especial o crédito de metano, e da implantação de biodigestores e sistemas de purificação de biogás (GOVERNO FEDERAL, 2022).

Já o novo marco legal do saneamento básico disposto na Lei nº 14.026 de 15/07/2020, apresenta dentre os principais pontos, a meta de alcançar 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até dezembro de 2033 e o estímulo de investimento privado através de licitação entre empresas públicas e privadas. Segundo a Abiogás, este novo marco eleva a produção potencial de biometano em 2,9 milhões de m³/dia, oriundo do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) (ABIOGAS, 2020).

No âmbito dos governos locais, iniciativas voltadas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos, aumento da reciclagem, reaproveitamento e reuso de recursos naturais vêm sendo implementadas. Na Tabela 2, observa-se o formato de implementação, objetivos e características de projetos nas cidades de Entre Rios do Oeste (PR), Belo Horizonte (MG) e Recife (PE).

Tabela 2: Iniciativas de economia circular no âmbito das cidades brasileiras

| Projeto /Cidade | Implementação/Objetivos | Características/Impactos |
|---|--|--|
| Biogás na cidade de Entre Rios do Oeste (PR). | Concebido pela chamada de P&D estratégico nº 014/2012 da ANEEL, patrocinado pela Copel e executado pela CIBiogás e Parque Tecnológico Itaipu (PTI). Visa a geração de energia elétrica a partir do biogás. As unidades produtoras de biogás da cidade são conectadas a uma rede coletora de cerca de 20 km que transporta o biogás até uma Minicentral | Resultado do projeto: tratamento diário de 215 t de resíduos; produção de 4.600 m ³ /dia de biogás, renda ao suinocultor, geração de 3.000 MWh/ano de energia elétrica; solução para o problema ambiental da principal atividade econômica do município. Até setembro de 2020, o município obteve uma economia de cerca de R\$ 605 mil. |

| | | |
|--|---|---|
| | termelétrica de 480kW de potência instalada. | |
| Programa de Certificação em Sustentabilidade Ambiental. Belo Horizonte (MG). | Concebido pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (MG) - Comitê Municipal de Mudanças Climáticas e Ecoeficiência (CMMCE). Visa a redução do consumo de água, de energia, das emissões atmosféricas e da geração de resíduos sólidos, além de alternativas de reciclagem e de reaproveitamento dos resíduos gerados através da certificação ambiental de empreendimentos públicos e privados, residenciais, comerciais e/ou industriais. | A adesão dos empreendedores ao Programa de Certificação feita de forma voluntária e consensual. A base legal da certificação é a Deliberação Normativa nº 66/2009 do Conselho Municipal de Meio Ambiente - COMAM, que estabeleceu medidas de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas e a Portaria SMMA nº 06/2012 da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, que regulamenta o Programa. |
| Biogás de Aterro. Região Metropolitana de Recife (PE). | Projeto Piloto para Recuperação Energética do Biogás no Aterro da Muribeca financiado por um Projeto de P&D ANEEL/CHESF, em convênio com o Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE e com a EMLURB da Prefeitura da Cidade do Recife. Tem como objetivo geral avaliar o potencial de geração de biogás e a viabilidade da produção de energia elétrica em uma Célula Experimental de RSU e uma Usina Piloto de 20kVa. | Produção e comercialização da energia elétrica proveniente de biogás gerada na unidade, além das reduções de emissões de GEE. |

Fonte: Elaboração própria com base em CIBlogas (2021), Prefeitura de Belo Horizonte (2019) e OICS (2021).

Por fim, vale destacar que apesar dos avanços em direção a projetos e processos de economia circular em todo o mundo, há barreiras tecnológicas, econômicas e institucionais que dificultam a sua implementação. A falta de informação associada a tecnologias defasadas ou inadequadas, projetos circulares limitados, poucos exemplos de demonstração em larga escala e a falta de dados sobre impactos são algumas das barreiras tecnológicas encontradas. Dentre os aspectos econômicos, a demanda de altos investimentos iniciais e linhas de crédito limitadas para modelos de negócios circulares, a concorrência do material reciclado/reutilizado com os baixos preços de materiais virgens são barreiras relevantes.

O fator regulatório/institucional pode ser considerado um indutor ou uma barreira para a economia circular em função da existência ou não da criação de fundos de apoio, políticas de tributação e subsídio, além do ordenamento jurídico e os requisitos padrões, principalmente as normas e leis ambientais e as diretrizes para gestão de resíduos (Oliveira, 2019).

3. Eficiência Energética em Edificações

As edificações são um dos elementos-chave das cidades inteligentes e sustentáveis, tanto pela possibilidade de contribuir para melhorar a qualidade das condições de trabalho e moradia, quanto pelas oportunidades de minimização do impacto ambiental local e global. Do ponto de vista energético, há diversas oportunidades de iniciativas no setor de edificações, dentre as quais, o gerenciamento da iluminação e do consumo de energia em edificações novas ou existentes, os serviços de aumento do conforto térmico e acústico, a maior participação de fontes de energia renovável, bem como ações específicas de eficiência energética. O setor de reforma de edificações, edificações verdes, iluminação pública, gerenciamento de lixo e de recursos hídricos são componentes que possuem relação direta com um “Ambiente inteligente”, característica de uma Cidade Inteligente, conforme apresentado por Giffinger *et al.* (2007).

Globalmente, os setores de construção civil e edifícios combinados são responsáveis por mais de um terço do consumo final de energia e por quase 40% do total de emissões diretas e indiretas de CO₂. Cabe ressaltar que as emissões diretas e indiretas de eletricidade e calor comercial usados em edifícios aumentaram para o patamar de 10 GtCO₂ em 2019, o nível mais alto já registrado⁴. Além disso, a demanda de energia de edifícios e construção de edifícios continua a subir, impulsionada pelo maior acesso à energia nos países em desenvolvimento, maior propriedade e uso de dispositivos que consomem energia e rápido crescimento na área global de edifícios (IEA, 2020).

O enorme potencial de ganhos de eficiência energética no setor de edificações vem sendo considerado alvo prioritário de políticas entre as grandes economias do mundo, especialmente em um momento pós-pandemia. Isso se deve não apenas pela sua contribuição para as mudanças climáticas e avanço na transição energética, mas também para a recuperação econômica, tendo em vista que o setor de construção e afins emprega cerca de 10% da força de trabalho global (EIA, 2020).

Dados do Balanço Energético Nacional indicam que no Brasil, o setor de edificações, composto por consumidores residenciais, comerciais e públicos, e a construção civil respondem por aproximadamente 15% do consumo de energia e 53% do consumo de eletricidade. Nos próximos dez anos, segundo projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2031), as edificações devem contribuir com cerca de 60% dos ganhos totais de eficiência elétrica. Já o setor industrial deve ser responsável por mais de 30% desses ganhos em 2031 (EPE, 2022). No longo prazo, a participação da eletricidade na matriz energética do setor de edificações tende a aumentar ainda mais. Este crescimento se deve principalmente ao aumento do uso no condicionamento ambiental, mas também ao aumento de posse de equipamentos por consumidores residenciais diante de um cenário de crescimento de renda per capita (EPE, 2018a).

Com intuito de contribuir para a redução da demanda potencial de energia elétrica, políticas de etiquetagem e índices mínimos de eficiência energética vêm sendo implementadas no Brasil para eliminar equipamentos menos eficientes e encorajar fabricantes e construtores a desenvolverem e ofertarem equipamentos e edificações mais eficientes. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) é um dos principais programas de governo brasileiro voltado para a implementação de políticas de eficiência energética. No segmento de iluminação pública, destaca-se o Procel Reluz, enquanto no segmento de edificações, o Procel Edifica e o

⁴ Vários fatores contribuíram para esse aumento, incluindo a crescente demanda de energia para aquecimento e resfriamento, com a crescente posse de aparelhos de ar-condicionado e eventos climáticos extremos (IEA, 2020).

Selo Procel são exemplos de iniciativas exitosas, como pode ser verificado no Box 3. Em 2020, a economia de energia estimada a partir das ações do Procel chegou a 22 bilhões de kWh, aumento de 2% em relação a 2019. Essa economia é equivalente ao consumo de mais de 11 milhões de unidades consumidoras residenciais por um ano (ELETROBRAS, 2021).

Box 3: Procel Reluz, Procel Edifica e Selo Procel Edificações

Dentre as iniciativas do Procel, destaca-se o **Procel Reluz** que foi criado em 2000 com o objetivo de promover investimentos em sistemas eficientes de iluminação pública com tecnologia LED (sigla para diodos emissores de luz) em municípios de todo o Brasil. Desde 2016, o Procel Reluz realiza Chamadas Públicas, a fim de selecionar projetos que receberão apoio financeiro e técnico do programa. As parcerias estabelecidas com as administrações locais permitem aos municipais participantes diminuir despesas com o consumo de energia elétrica e contribuir para a maior segurança das vias públicas.

A Eletrobras, no âmbito do Procel, investiu R\$ 30 milhões nos 69 projetos selecionados na 2ª Chamada Pública do Reluz, que foi divulgada no final de 2019 e teve boa parte de suas ações desenvolvidas em 2020. Cada iniciativa receberá, em média, R\$ 435 mil. As regras da 2ª Chamada Pública permitiram que cada Município, de acordo com o seu interesse e a sua estrutura, escolhesse para quais itens de serviços ou materiais desejaria contar com o aporte do Reluz. Desse modo, alguns municípios somarão recursos próprios ao custeio do Procel (ELETROBRAS, 2021).

Em 2020 foi lançado também no âmbito do programa, o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos da Iluminação Pública, o qual orienta gestores quanto aos riscos de agressão ao meio ambiente e à saúde humana decorrentes do manejo, armazenamento, transporte e destinação final dos equipamentos de iluminação pública e seus resíduos.

O **Procel Edifica** é uma das linhas de atuação do Procel que abrange diversas ações voltadas para eficiência energética e redução de desperdícios em edificações, tais como os projetos: Desempenho Energético Operacional (DEO) e Conforto do Usuário, voltado a empresas de *facilities* e de gestão predial, Etiquetagem e Selo Procel nas Construtoras, Benchmarks de Consumo de Energia, Integração de Eficiência Energética e Geração Distribuída; e o Selo Procel Edificações.

O **Selo Procel Edificações**, foi estabelecido em novembro de 2014, sendo um instrumento de adesão voluntária que tem por objetivo identificar edificações (a princípio não residenciais) que apresentem melhores classificações de eficiência energética em uma dada categoria, motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar imóveis mais eficientes (PROCEL, 2020). A partir de 2020, o Selo Procel Edificações passou a contemplar também unidades habitacionais autônomas – casas e apartamentos de edifícios multifamiliares, tanto em fase de projeto quanto já construídos. Este representa uma importante iniciativa já que unidades residenciais representam 50% do consumo de eletricidade do segmento de edificações no País (ELETROBRAS, 2021).

Recentemente, o processo de digitalização das redes elétricas bem como das edificações repercute no surgimento de novos conceitos e possibilidades, como é o caso das edificações NZEB (*Near Zero Energy Buildings*) ou edificações quase zero emissões, em português (Box 4) e o *Grid-interactive efficient building* (GEB) ou edificação eficiente em interação com a rede elétrica, em português. Este último é um conceito abrangente que envolve a integração e otimização contínua de Recursos Energéticos Distribuídos – REDs⁵ para o benefício de proprietários de edifícios, residentes e o uso da rede elétrica (DOE, 2019).

O GEB é um edifício com eficiência energética que utiliza tecnologias inteligentes e REDs para fornecer flexibilidade de demanda e ao mesmo tempo otimizar o custo de energia, serviços de rede e necessidades e preferências dos ocupantes de forma contínua e integrada.

Os GEBs são geralmente caracterizados por 4 recursos principais: eficiência energética, conexão, inteligência e flexibilidade como pode ser observado na Figura 2.

⁵ Recursos Energéticos Distribuídos (RED) – incluindo eficiência energética, resposta da demanda, geração distribuída, veículos elétricos e armazenamento – geralmente são avaliados, programados, implementados, e gerenciado separadamente.

Figura 2: Característica da Edificação eficiente em interação com a rede elétrica



Fonte: Elaboração própria a partir de DOE (2019).

Box 4: Edificações quase zero emissão

Um conceito que vem ganhando notoriedade no mundo é o NZEB (*near zero energy buildings*) que, em linhas gerais, alinha alta performance energética com recursos de energia renováveis produzidos localmente ou próximo da edificação. Na União Europeia, novas edificações a partir de 2021 deverão seguir este conceito, o qual já é uma obrigação para o caso de edificações públicas desde 2019 (EC, 2021).

Dentre os diversos projetos e programas implementados na União Europeia para disseminação de edifícios de baixa ou zero emissão líquida, destaca-se o NEXT-BUILDINGS. O Projeto aborda edificações com baixo consumo de energia e tem como objetivo criar a estrutura adequada para demonstração e disseminação de tecnologias inovadoras e econômicas de eficiência energética. O projeto considera a análise de adequação das tecnologias de eficiência energética (incluindo sua viabilidade técnica e econômica), realiza a demonstração da atividade em diversos edifícios novos e, por fim, promove a disseminação e replicação a nível europeu (EC, 2017).

No contexto brasileiro, foi em 2019 que o Procel lançou a 1ª Chamada Pública NZEB Brasil que obteve 32 instituições inscritas. Após um processo de avaliações considerando os critérios de sustentabilidade, visitaçao, novas tecnologias e uso da edificação, os quatro projetos beneficiários aprovados em 2020 receberam recursos proveniente do 2º PAR Procel para a construção de edificações NZEB. Os projetos aprovados foram: a Nova Casa Cepel NZEB, do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica do Rio de Janeiro; o Anexo FAUrb – NZEB, da Universidade Federal de Pelotas (UFPel/RS); o LabZero, da Universidade de Brasília (UnB) e o Ombo'êva: Green Smart Building, proposto pela Universidade Federal de Integração Latino-Americana (Unila), de Foz do Iguaçu (PR) (ELETROBRAS, 2021).

No âmbito dos governos locais, são variadas as iniciativas de implementação de eficiência energética, mas dentro do escopo considerado neste informe podem-se enfatizar as iniciativas de modernização do parque de iluminação pública através do instrumentos de Parcerias Público Privadas (PPP), como no caso da Prefeitura de Belo Horizonte (MG) e do projeto Rio Luz no Rio de Janeiro (RJ), além de regulamentações municipais voltadas para construções eficientes e sustentáveis, como pode ser observado nos exemplos da Tabela 3.

Tabela 3: Iniciativas em edificações e iluminação pública no âmbito das cidades brasileiras

| Projeto /Cidade | Implementação/Objetivos | Características/Impactos |
|---|---|---|
| Código de Sustentabilidade. Rio de Janeiro (RJ) | Desenvolvido pela Prefeitura do Rio de Janeiro com apoio da Rede C40. Elaboração de normativa municipal estabelecendo critérios de construção sustentável a serem adotados na elaboração de projetos, construção e modificação de edificações na cidade. Complementar ao novo Código de Obras | Racionalização no consumo de energia; disseminação de boas práticas de eficiência energética em todos os tipos de edificações. Para o município: redução nos custos de energia; capacidade de geração de recursos próprios para investimento nas próprias edificações municipais, através da criação de um Fundo Verde. |

| | | |
|---|---|--|
| | Simplificado, em consonância com o Plano de Ação Climática. | |
| Modernização do Parque de Iluminação Pública. Belo Horizonte (MG) | Implementação através de Parcerias Público Privadas (PPP) contratadas pela Prefeitura de Belo Horizonte. Visa à modernização na iluminação pública da cidade, redução no consumo de energia elétrica e de GEE e economia aos cofres públicos. | Em operação desde 2017, o Parque constituído por de cerca de 175.000 unidades de iluminação pública (UIP) passou por um processo de modernização. Já foi alcançado uma redução na média diária de consumo (base agosto/2020) estimada em 34%, representando uma projeção de economia anual de cerca de R\$ 16 milhões e redução total de 1,6 milhão de toneladas métricas ao ano de carbono equivalente, além da melhoria da segurança em vias e logradouros públicos. |
| Projeto de modernização da iluminação pública - Riolum. Rio de Janeiro (RJ) | Implementado pela Prefeitura utilizando Parcerias Público Privadas (PPP) para a substituição das lâmpadas do parque de iluminação pública da cidade por luminárias com lâmpada do tipo LED, ou tecnologia equivalente disponível. O projeto também prevê a implantação de um sistema de telegestão. | A Prefeitura do Rio de Janeiro concluiu, em novembro de 2019, a licitação da PPP para realizar a modernização de todo o parque de iluminação pública da cidade. A partir da assinatura do contrato, serão investidos cerca de R\$ 1,4 bilhão na modernização da iluminação nos próximos 20 anos. |

Fonte: Elaboração própria com base em Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2020) e Prefeitura da Cidade de Belo Horizonte (2020).

A evolução da eficiência energética em edificações passa por diferentes estágios e processos a depender de fatores como: evolução tecnológica, governança dentro dos governos locais, renda per capita das cidades e comunidades e mapeamento das necessidades e desafios locais para sua implementação. Assim, apesar das vantagens, o desenvolvimento de uma edificação eficiente em interação com a rede elétrica, principalmente através do uso das TICs, pode ser considerado visão de longo prazo, mesmo em países desenvolvidos. Segundo DOE (2019), ainda há pesquisas insuficientes sobre tecnologias e estratégias para otimizar a interação entre eficiência energética e resposta da demanda, bem como explorar totalmente uma abordagem otimizada e integrada para flexibilidade da demanda e gerenciamento do lado da demanda.

4. Recursos Energéticos Distribuídos (RED)

Os Recursos Energéticos Distribuídos (RED) ou *Distributed Energy Resources* (DER, em inglês) são definidos como tecnologias de geração e/ou armazenamento de energia elétrica, localizados dentro dos limites da área de uma determinada concessionária de distribuição, normalmente junto às unidades consumidoras, atrás do medidor (*behind the-meter*). De acordo com a EPE (EPE, 2019^b), considera-se que os RED contemplam: Geração Distribuída (GD); Armazenamento de Energia; Veículos Elétricos (VE) e sua estrutura de recarga; Eficiência Energética; e Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD).

Dentre as vantagens dos REDs estão a maior participação do consumidor tanto na geração, quanto na gestão do consumo da sua própria energia. A implementação dos REDs pode postergar investimentos das redes de transmissão e distribuição, agregando capacidade de geração e flexibilidade. Do ponto de vista operativo, os REDs podem fornecer serviços ancilares, como reserva secundária, por exemplo, para o operador do sistema. Analogamente, a inserção dos REDs tem desdobramentos em outros setores, como os de transporte e de calor (EPE, 2018^b).

Dentre os REDs, destaca-se atualmente a expansão da micro e mini geração distribuída (MMGD) de fonte solar que, em decorrência de custos cada vez mais competitivos, vem sendo implementada nas cidades, tanto através de projetos dos governos locais, quanto por empresas privadas⁶. Como resultado, em 2020 a MMGD superou a expansão de todas as fontes centralizadas, com exceção das hidrelétricas (4,8 GW), alcançando 2,5 GW de capacidade instalada (Box 5). Por outro lado, o uso de baterias junto às unidades consumidoras que se apresenta como uma tendência em alguns mercados internacionais ainda conta com pouca difusão no Brasil, dentre outros motivos, pelo fato de não haver regulação específica para o uso de baterias com injeção na rede ou incentivos para o armazenamento na geração (EPE, 2021).

Box 5: Contexto da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) no Brasil

No Brasil, o instrumento que viabilizou a conexão de pequenos e médios geradores ao sistema de distribuição foi a Resolução Normativa (REN) n° 482/2012 da ANEEL, que instituiu o modelo de *net-metering* no País. Este regulamento criou as figuras do micro e do minigerador distribuído (MMGD). Em 2015, o regulamento foi aprimorado, de modo a tornar o processo de conexão mais célere e ampliar o acesso à geração distribuída para um número maior de unidades consumidoras. Em janeiro de 2022 foi aprovada a Lei n. 14.300 de 2022 que buscou trazer mais segurança jurídica aos investidores e apresentou uma série de alterações no Modelo de Compensação de Energia Elétrica estabelecido pela REN 482/2012. A qualidade dos recursos energéticos nacionais, as tarifas finais de eletricidade e o modelo de compensação de créditos são alguns dos fatores que tornaram o investimento de geração própria bastante rentável no Brasil. De fato, a modalidade de micro e minigeração distribuída (MMGD) cresceu e está se tornando protagonista na expansão da oferta no mercado brasileiro.

Em 2020, a fonte solar distribuída superou a expansão de todas as fontes centralizadas, adicionando 2,5 GW ao sistema elétrico. No âmbito do Plano Decenal de Energia 2031 foram elaborados sete cenários de inserção da micro ou minigeração distribuída no horizonte decenal, com a capacidade total instalada podendo variar entre 27 GW e 47 GW a depender do cenário regulatório. No cenário Referência do PDE 2031, haverá cerca de 4 milhões de adotantes em 2031, totalizando 37,2 GW de capacidade instalada, que irão contribuir com 7,2 GW médio de geração em 2031.

⁶ Importante destacar que a modularidade da instalação de MMGD da fonte solar associada à potencial redução na conta de eletricidade, permite decisão individual de investimento e contribui para a inserção da fonte. Não obstante, outras tecnologias elegíveis à MMGD permitem maiores economias, mas seus módulos de viabilidade são maiores (conforme tabela 9-3 e gráfico 9-22 do PDE 2030). Modelos de negócios que permitam reduzir o custo de transação para essas fontes, podem potencializar ainda mais a MMGD, agregando mais economicidade e diversidade no suprimento além de aumentar a resiliência dos sistemas energéticos das cidades.

Para a disseminação dos REDs nas cidades, um elemento de fundamental importância é a implementação de redes inteligentes (*smart grids*) de distribuição de energia. Através delas será possível uma vasta penetração de novas tecnologias que as redes elétricas atuais ainda não suportam (EPE, 2019^b). As redes inteligentes permitem que um agregador ou distribuidor aumente seu nível de controle sobre milhões de dispositivos conectados e gere fluxos de demanda e energia em tempo real, através de dispositivos de comunicação digital bidirecional como detectores de falha, sensores de tensão e medidores inteligentes.

De forma específica, a implantação dos medidores inteligentes, ao propiciar o fluxo bidirecional de energia, melhorar o gerenciamento do perfil de consumo e possibilitar a resposta da demanda, é uma das variáveis-chave para a descentralização da operação do sistema elétrico e criação de novas oportunidades de negócios de energia no varejo, como pode ser constatado no Box 6.

○ Box 6: Novos negócios através do uso de tecnologias digitais e REDs

DeJoule, SmartJoules (Índia): Desenvolve projeção e gerenciamento de demanda. É uma plataforma de otimização de ar-condicionado com um software integrado que usa IA para facilitar o gerenciamento do lado da demanda e aumentar a eficiência e desempenho dos sistemas de ar-condicionado enquanto diminui os custos para os consumidores (IRENA, 2019)

EweLiNE (Alemanha): Realiza projeção de geração de energia renovável. Utiliza IA para prever o fornecimento de energia renovável com dias de antecedência. Obtém dados em tempo real de usinas de energia solar e turbinas eólicas em torno da Alemanha e alimenta-o em um algoritmo que usa aprendizado de máquina para calcular a geração de energia renovável nas próximas 48 horas (Universidade do Chile, 2020).

Enguia (Brasil): É uma consultoria eletrônica em eficiência energética para edificações. Utiliza tecnologias de monitoramento do consumo de energia e IA para produzir informações de redução de custo com energia para o cliente (Enguia, 2021).

OhmConnect (EUA): Viabilizam o conceito de casa inteligente. Através de processos de gerenciamento pelo lado da demanda, clientes podem reduzir o custo de energia. Utiliza acesso aos dados do medidor inteligente privado, possibilita previsão de consumo individual e integração com aparelhos inteligentes.

Esse processo envolve a coleta e processamento de maior volume de dados de consumo, geradores, tarifas, *status* da infraestrutura de transmissão e armazenamento, entre outros, com maior resolução e com acesso mais imediato, ou seja, *Big Data* aplicado ao setor elétrico e ao planejamento (EPE, 2019^b). Um exemplo da aplicação de medição inteligente é o Programa Peak-Time Rebate (PTR) de Maryland (EUA), que pode ser observado no Box 7.

○ Box 7: O Programa *Peak-Time Rebate* (PTR) de Maryland (EUA)

O Peak-Time Rebate (PTR) é realizado pela Baltimore Gas and Electric Company (BGE). O programa é promovido para todos os clientes que possuem medidores inteligentes. Chamado de Smart Energy Rewards, tem a participação de 1,1 milhões de consumidores, com 75% do total. Os Energy Savings Days, dias em que a tarifa entra em ação, ocorrem quando a demanda prevista de energia tem a tendência de alcançar valores elevados.

Para aferir a quantidade de energia economizada, a concessionária de energia, de posse dos dados de consumo coletados pelo medidor inteligente, compara o uso com dias de similar temperatura do Energy Savings Day, formando deste modo o valor base de consumo no dia. O consumidor é remunerado em US\$ 1,25 por kWh economizado em relação ao valor base de consumo. Os consumidores também podem participar do Peak Rewards Program, no qual a BGE pode automaticamente controlar a central de ar-condicionado. Nesse programa, o eletrodoméstico teria a potência reduzida em 50% de 13h às 19h nos dias de evento.

Para informar os consumidores, em até 2 dias após o evento, é enviado um relatório com dados da diminuição de energia e é realizada comparação com o histórico do consumidor e de outros participantes do programa, utilizando conceitos de economia comportamental. De acordo com a aferição dos resultados, os impactos na demanda máxima são crescentes, chegando a mais de 300 MW de redução. O percentual de participação manteve-se em níveis altos nos últimos 5 anos (EPE, 2019b).

A implementação dos REDs nos governos locais ocorre de forma variada, em geral, com o apoio e parceria de instituições privadas e do terceiro setor. Há avanços significativos no que diz respeito a projetos relacionados à eletrificação da frota e recarga elétrica, mas destacam-se atualmente dentre os REDs os projetos de geração distribuída através de geração solar fotovoltaica. Pode-se citar como exemplo, a instalação de sistema de energia solar no metrô de Fortaleza (estação Juscelino Kubitschek) com cerca de 600 placas fotovoltaicas que deverá gerar eletricidade para a rede elétrica da cidade, sendo, em seguida, revertida para o metrô em forma de crédito de eletricidade, o que implicará em compensações nas contas de energia da empresa. O projeto é resultado da atuação da Prefeitura de Fortaleza junto à Enel Distribuição Ceará e à Companhia Cearense de Transportes Metropolitanos (METROFOR, 2021).

Na cidade de Recife (PE), o projeto Recife Cidade da Eficiência Energética (RCEE) propõe a instalação de painéis solares fotovoltaicos em equipamentos públicos nas áreas da saúde, da educação, do esporte e no edifício-sede da Prefeitura. Enquanto em Curitiba (PR), o Programa Mais Energia implementado pela prefeitura junto com a distribuidora CEPEL e apoio da instituição C40, incentiva a produção de energia renovável em espaços públicos. Este e outros exemplos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4: Iniciativas em recursos energéticos distribuídos no âmbito das cidades brasileiras

| Projeto /Cidade | Implementação/Objetivos | Características/Impactos |
|--|--|--|
| Programa Mais Energia Curitiba (PR) | Implementado pela Prefeitura de Curitiba através de parceria efetuada com a Copel no ano de 2019. Apoio C40 e agência de cooperação internacional do governo alemão (GIZ). Incentiva a implantação em espaços públicos de tecnologias que privilegiam o uso de fontes renováveis para a produção de energia. | Possibilitou a instalação de painéis solares na sede da prefeitura, o Palácio 29 de Março, em 2019. Pelo período de 12 meses, os painéis foram responsáveis pela geração de 205 MWh, resultando numa economia de R\$ 106 mil nos custos de energia elétrica e em 28 t a menos de gás carbônico emitido. O Programa continua vigente com outros projetos. |
| PPP Geração Distribuída Fortaleza (CE) | Implementado pela Prefeitura de Fortaleza por meio de PPP e apoio de instituições como o C40. Visa aumentar a geração de energia solar fotovoltaica em equipamentos públicos locais através de parceria público privada (PPP). | O projeto prevê a construção de 7 usinas de geração fotovoltaica, que fornecerão eletricidade por meio de geração remota (7.270 kWp), e outros 8 sistemas fotovoltaicos no telhado de algumas escolas, fornecendo eletricidade por auto geração local (214 kWp). |
| Cidade da Eficiência Energética. Recife (PE) | Desenvolvido pela Prefeitura do Recife com recursos do Programa de Eficiência Energética da Celpe, regulado pela ANEEL. O projeto piloto tem o apoio do ICLEI, da ONU habitat e financiamento da União Europeia. Dentre outras iniciativas, o RCEE propõe instalação de painéis solares fotovoltaicos em equipamentos públicos nas áreas da saúde, da educação, do esporte e no edifício-sede da Prefeitura. | O orçamento total previsto do RCEE é de R\$ 90 milhões. O Hospital da Mulher do Recife foi escolhido como piloto para receber o apoio necessário para a implantação. A expectativa é que a geração promova uma economia anual de 536,7 megawatt hora (MWh) de energia elétrica, o que representa R\$240 mil de economia anual na conta do hospital. |

Fonte: Elaboração própria com base em Prefeitura Municipal de Curitiba (2021); C40 Cities (2020); ICLEI (2021).

Apesar das inúmeras vantagens e dos exemplos de projetos que vem alcançando êxito, a implementação dos RED apresenta importantes desafios que vão além daqueles tecnológicos e financeiros. A implementação de tecnologias de redes inteligentes ainda apresenta muitas

incertezas, tanto em custo e desempenho da tecnologia, quanto em custos e benefícios e em questões não técnicas como a privacidade. Assim, não há uma estratégia única que faça o melhor uso dessas tecnologias.

Um caminho a seguir pode ser introduzir “inteligência” nos sistemas de eletricidade de forma incremental. Os sistemas de eletricidade unidirecionais de hoje em dia têm pouca ou nenhuma informação que flui dos consumidores para a concessionária. No outro extremo do espectro, há um sistema totalmente integrado que inclui vários tipos de recursos distribuídos, preços avançados e outras tecnologias relacionadas a redes inteligentes. Há, portanto uma ampla gama de possibilidades entre esses dois extremos (IRENA, 2016).

Projetos-piloto ou de demonstração que experimentam tecnologias de rede inteligente podem fornecer informações sobre o desempenho dessas tecnologias em um sistema e um contexto específico. Eles também podem aliviar as preocupações sobre como as tecnologias afetam a confiabilidade, como os consumidores reagem e o que significa abrir o sistema elétrico a novos atores e novas tecnologias.

5. Mobilidade Urbana

A mobilidade inteligente é um conceito amplo que facilita a sustentabilidade nos serviços de transporte, levando em consideração desafios tecnológicos, sociais, econômicos e ambientais. A mobilidade urbana e o uso da energia elétrica se tornarão cada vez mais interconectados (EMF, 2019), tendo o consumidor um papel importante através do uso crescente das TICs. Nos parágrafos seguintes, o tema de mobilidade urbana é apresentado sob a ótica de economia circular e recursos energéticos distribuídos (REDs).

A mobilidade urbana é um exemplo de como uma mudança de modelo linear para circular pode trazer diversos ganhos ambientais, sociais e econômicos para a sociedade, através da interface com o consumidor. De acordo com EMF (2019), o modelo linear de mobilidade resulta na alta dependência da propriedade individual de carros e combustíveis, criando altos níveis de congestionamento, levando ao desperdício de tempo e à perda de produtividade, bem como poluição, ruído, efeitos das ilhas de calor e esgotamento de recursos finitos.

Diante disso, um sistema circular de mobilidade urbana busca acomodar efetivamente as necessidades de mobilidade do usuário diversificando os modos de transporte. No entanto os benefícios da economia circular na mobilidade vão além dos modos de transporte e incluem a redução do consumo de material virgem, o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) para a produção de combustíveis automotivos⁷ (biometano), eliminando desperdícios e poluição, maximizando infraestrutura e utilização de veículos e redução dos custos de uso e operação.

Para se alcançar tais benefícios da mobilidade circular, faz-se necessária a articulação entre autoridades da área de mobilidade urbana, planejamento territorial e governança local para que seja possível a redução da demanda por transporte, a mudança para modos de transporte mais eficientes, como os transportes coletivos, e a melhoria da eficiência dos veículos. É necessário buscar as sinergias com modos de transporte de massa e veículos compartilhados, ampliar a digitalização e dados abertos (baixar os custos de conexão e de serviços associados), bem como investir em telemática e reorganização de espaços públicos (cidades polinucleadas), a fim de destruir demandas desnecessárias por mobilidade (EPE, 2018c).

Neste contexto, uma governança inovadora, como mencionado anteriormente neste estudo, aliada a tecnologias digitais, Big Data, IA, *softwares* de navegação e as redes de internet são fundamentais para viabilizar novas soluções e modelos de negócio dentro de um ambiente cada vez mais complexo e dinâmico. No Box 8, pode-se observar dois exemplos do uso de dados abertos no setor de transportes, utilizando Big Data e IA para otimizar a mobilidade dentro das cidades.

Sob a ótica dos recursos energéticos distribuídos (RED), a infraestrutura energética contempla principalmente os veículos elétricos e as baterias elétricas. A participação crescente de veículos elétricos na frota mundial nos próximos anos impactará significativamente a expansão e operação dos sistemas elétricos. As tecnologias de recarga inteligente para veículos elétricos

⁷ O informe técnico Modelos de negócios para aproveitamento energético de RSU (EPE, 2021) discute diferentes modelos de negócios para o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos. Um dos modelos possíveis é a utilização da energia dos resíduos (biometano ou eletricidade) para abastecer a demanda dos serviços públicos de transportes, em substituição ao óleo diesel importado. De acordo com o estudo, o aproveitamento prioritário de biometano e eletricidade pela frota de serviços públicos, desde que convertida, mostra-se viável para 82% da oferta e aderente aos conceitos de economia circular, cidades inteligentes e sustentáveis.

são uma tendência e terão um papel importante como recurso nas redes de distribuição à medida que o consumo para esta finalidade aumente (EPE, 2019^b).

Em um sistema de recarga inteligente de veículos elétricos são trocadas informações entre ponto de carregamento e os operadores das redes para permitir o controle das recargas. Os sinais enviados pelos operadores das redes podem reduzir o carregamento nos momentos de sobrecarga ou na ocorrência de carregamentos simultâneos. Os sinais também poderiam acionar o carregamento de veículos em situações de excesso de geração de fontes variáveis.

Associado à recarga inteligente, existe a possibilidade de troca bidirecional de carga nas redes com uso de tecnologias *vehicle-to-grid* (V2G). Esta alternativa permitirá que as baterias dos veículos elétricos injetem energia nas redes, provendo importantes serviços aos sistemas. Vale destacar, entretanto, que as tecnologias V2G encontram-se em estágios iniciais de desenvolvimento e existem diversas barreiras técnicas, comerciais e regulatórias para sua adoção (EPE, 2019^b).

Box 8: Dados abertos, IA e Big Data para otimização da mobilidade

Em Londres, os dados abertos aprimoram serviços públicos, privados e transporte ativo. Com mais de 31 milhões de viagens feitas em Londres todos os dias, o Transport for London (TfL) coleta vastas quantidades de dados anônimos sobre como pessoas, veículos e transporte público se movem. Por meio da análise de Big Data, o TfL atua na otimização pública de linhas de transporte, melhorando as condições dos pedestres, monitorando a poluição do ar, prevenindo mudanças de padrões de transporte, suporte ao uso de veículos elétricos, e diminuição de acidentes de trânsito.

Os dados são também disponíveis ao público para estimular soluções inovadoras aos desafios de transporte da cidade. Quase 700 aplicativos foram desenvolvidos até agora, que são regularmente usados por mais de 40% dos londrinos. Em 2017, estima-se que a liberação do uso de dados abertos gerou economia anual, benefícios e economias de até 130 milhões de libras esterlinas para viajantes, para a cidade e ao próprio TfL. Além disso, a iniciativa de dados abertos suporta diretamente cerca de 500 novos empregos e indiretamente outros 230 empregos na cadeia de suprimentos e na economia em geral (EMF, 2019).

No Brasil, a startup brasileira Quicko possibilita que usuários de São Paulo e Rio de Janeiro otimizem suas viagens na cidade através de aplicativo que utiliza tecnologias como big data e inteligência artificial para oferecer combinações de meios de transporte (transporte público com bicicletas compartilhadas, táxis ou carros de aplicativo). A Plataforma que é gratuita também fornece informações sobre horário de ônibus, ou quantas bicicletas estão disponíveis na estação mais próxima, dentre outros serviços (Quicko, 2021).

No que diz respeito ao ritmo de entrada da eletromobilidade nos transportes e a predominância das novas rotas tecnológicas veiculares, o estudo sobre Biocombustíveis e Eletromobilidade, elaborado pela EPE (2018^c), ressalta que estas são incertezas críticas que impactam diversas cadeias energéticas e industriais e seus *stakeholders* (incluindo fornecedores de bens e serviços). A magnitude potencial e a complexidade dessas transformações, assim como seus efeitos sobre os *stakeholders*, evidenciam a sensibilidade sociopolítica e econômica das decisões a serem tomadas no planejamento energético de longo prazo.

As iniciativas de governos locais no âmbito da mobilidade urbana são de diversas naturezas e dependem de características como: o tamanho da cidade, a densidade populacional e a renda per capita, que impactam por exemplo na duração e nas distâncias médias das viagens realizadas. São Paulo, por ser a cidade mais populosa do Brasil e apresentar grandes desafios associados ao transporte urbano, vem fomentando inovação nas soluções de mobilidade, como é o caso do projeto MobiLab+, uma estratégia de governo aberto no qual dados públicos são compartilhados com entes privados para acelerar a transformação digital em prol de melhorias no trânsito. Exemplos de iniciativas em mobilidade nas cidades brasileiras podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5: Iniciativas em mobilidade no âmbito das cidades brasileiras

| Projeto /Cidade | Implementação/Objetivos | Características/Impactos |
|---|---|--|
| Estudo de viabilidade de ônibus urbano zero emissão na frota de transporte público (RJ) | Desenvolvido pela Prefeitura do Rio de Janeiro, com apoio da Rede C40, da EPE e do ITDP - Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento. Objetivo de analisar a viabilidade técnico-econômica de substituição de ônibus convencionais e articulados com motores a combustão por veículos elétricos, de forma a embasar a introdução de ônibus elétricos na frota de transporte público. | O estudo foi apoiado pela Ferramenta de Avaliação Técnico-Econômica para Ônibus Elétrico, desenvolvida pela EPE, que confronta os resultados operacionais e financeiros decorrentes da aquisição e de consumo de ônibus a diesel e de ônibus elétrico ao longo da vida útil dos veículos, e avalia diferentes cenários de financiamento e opções de aquisição de eletricidade. |
| MobiLab+ (SP) | Implementado pela Prefeitura de São Paulo para fomentar o ecossistema de inovação da cidade. Atua no segmento de mobilidade urbana, através de abertura de dados com objetivo de permitir o lançamento de aplicativos e ferramentas, com foco no transporte e no trânsito. | O MobiLab+ une estratégias de inovação tecnológica e de governo aberto, para acelerar a transformação digital. Dentre os impactos esperados, está a melhora no trânsito da cidade com repercussões no consumo de combustíveis e na poluição do ar. |
| Plano Cicloviário (SP) | Implementado pela Prefeitura de SP, visa consolidar o uso da bicicleta como veículo de transporte na cidade, de caráter inclusivo e universal, e garantir a segurança dos cidadãos em seus deslocamentos. Tem também por objetivo consolidar uma rede cicloviária abrangente, segura e integrada, contemplando os elementos da infraestrutura urbana para circulação, estacionamento e oferta de bicicletas compartilhadas. | O Plano Cicloviário do Município de São Paulo 2019-2028 considera as diretrizes estabelecidas no Plano Diretor Estratégico de São Paulo – PDE, assim como o disposto no Plano de Mobilidade do Município de São Paulo – PlanMob/SP. Para 2028, o plano prevê que a cidade chegue a 1800 km de ciclovias. |

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2020^a), Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2020), Prefeitura de São Paulo (2020).

Apesar das diversas soluções e tecnologias voltadas para a mobilidade urbana que emergem no mundo, é preciso destacar que um dos principais desafios da mobilidade urbana em países em desenvolvimento é a tendência de crescimento da frota de veículos leves e seus impactos na sustentabilidade das cidades. A posse de veículos no Brasil e em diversos países emergentes ainda é relativamente baixa quando comparada a países com alta taxa de motorização como os EUA ou a maioria dos países da Europa Ocidental.

Este fato, quando associado às perspectivas de incremento de renda per capita nos próximos anos podem ocasionar o aumento da posse de veículos individuais, caso as políticas de mobilidade não apontem explicitamente para caminhos de economia circular aplicados à mobilidade urbana e que enderecem de forma efetiva às questões sociais a ela relacionadas.

O relatório *Insight into Future Mobility* do Instituto Tecnológico de Massachussetts (MIT, 2019) avaliou como se comporta a posse e o uso de veículos individuais em algumas cidades nos EUA e na China, concluindo que não há diferença significativa entre as diferentes gerações quanto à posse e uso de carros. Em geral, em países emergentes, incluindo o Brasil, fatores como *status* social são mais presentes na preferência dos consumidores, o que o estudo chamou de “*car pride*”.

No que se refere especificamente a soluções voltadas para novas tecnologias veiculares, como os veículos elétricos, os altos custos associados ainda constituem uma barreira que pode implicar em uma transição energética mais longa (MIT, 2019). No caso brasileiro, os veículos elétricos híbridos (HEV), inclusive as suas versões *flexfuel*, construirão progressivamente a ponte para a eletromobilidade.

No que se refere à utilização dos veículos elétricos e baterias como RED, ressalta-se que sua integração com as tecnologias de gestão da recarga depende não somente de aspectos tecnológicos, mas também de desenhos de mercado adequados. Neste sentido, o desenho de tarifas que buscam incentivar a decisão econômica dos agentes em conjunto com outros aspectos regulatórios são fatores de influência sobre os modelos de negócios para recarga.

6. Reflexões e Desdobramentos

O presente informe é o segundo de uma série de publicações que pretende discutir o papel da energia nas cidades inteligentes. A primeira edição desta série apresentou uma introdução conceitual à temática e seu caráter indissociável no que diz respeito às discussões do processo de transição energética, mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Nesta edição, é feita uma análise para compreender determinadas tendências e iniciativas que se concretizam no ambiente das cidades inteligentes de forma particular e estão promovendo a reconfiguração do sistema energético com impactos potencialmente amplos no médio e no longo prazo.

Estas tendências ou iniciativas, se traduzem por exemplo, na implementação de novos modelos de negócio, inovação em *design* de produtos e engenharia de materiais que permitam a transição de uma economia linear para um modelo circular, promovendo a segurança do suprimento de energia, redução na dependência de importação de insumos e da geração de resíduos. Esse é o caso do aproveitamento de resíduos sólidos urbanos ou efluentes de estações de tratamento de esgoto em plantas de biogás para a geração de energia elétrica, energia térmica e biometano.

A ampliação dos ganhos de eficiência energética do setor de edificações, a qual pode se dar desde a forma pontual na troca do sistema de iluminação até um formato mais amplo envolvendo a integração e otimização contínua da edificação com a rede elétrica, permite fornecer flexibilidade de demanda e ao mesmo tempo busca otimizar o custo de energia. Por outro lado, através da disseminação de recursos energéticos distribuídos nas cidades, tais como a geração distribuída e o armazenamento de energia, torna-se possível a postergação de investimentos nas redes de transmissão e distribuição.

A hibridização progressiva e maior eletromobilidade, paralelamente ao planejamento urbano e ao uso de dados de mobilidade urbana compartilhados *online* em plataformas abertas, têm o potencial de deslocar a demanda de combustíveis fósseis, tornar o sistema de transporte de passageiros mais eficiente, menos poluente e permite ainda prestar serviços ancilares à rede elétrica por meio do abastecimento destes veículos.

Todos estes exemplos de iniciativas requerem, em algum grau, a implementação de tecnologias de informação e comunicação (TICs), tais como Internet das Coisas, Inteligência Artificial (IA) e *Big Data* para serem disseminadas e potencializadas, associadas a requerimentos técnicos como softwares para IA de sistemas específicos, plataformas de nuvem, dentre outras. Além disso, a transformação do sistema energético e a implementação de inovações que auxiliem o processo de transição energética requer que essa infraestrutura das TICs esteja integrada com a infraestrutura de energia, tais como as redes e os medidores inteligentes, pontos de recarga para veículos elétricos e novas formas de armazenamento de energia. Na Tabela 6 pode-se observar exemplos de aplicações, infraestrutura e tecnologias e projetos pertinentes a cada uma das iniciativas destacadas neste estudo.

Tabela 6: Exemplos de aplicações, infraestrutura e tecnologias e projetos pertinentes a cada uma das iniciativas de energia nas cidades

| Iniciativas | Aplicações | Infraestrutura e tecnologias | Projetos |
|--|---|---|---|
| Economia circular e saneamento | Gerenciamento de resíduos sólidos Reciclagem e reúso de infraestrutura Rastreabilidade no uso de produtos Produção de biogás | Plantas de biogás <i>big data, IoT</i> <i>Blockchain</i> Sensores inteligentes | <i>Waste-to-energy</i> Etiquetagem e certificação energética Geração de eletricidade através de biogás Produção de biometano e uso em frotas de serviços públicos Design circular |
| Edificações e iluminação pública | Iluminação mais eficiente Baixa emissão nas edificações Sustentabilidade em edificações Edificações inteligentes em interação com a rede | Lâmpadas LED Equipamentos/eletrodomésticos mais eficientes Sensores inteligentes Redes de internet | Certificação/selo de edificações Edificações quase zero emissões Iluminação pública eficiente Normas de sustentabilidade na construção civil |
| Mobilidade e planejamento urbano | Integração de meios de transporte Mobilidade compartilhada Eletromobilidade otimização de viagens | <i>Big data, IoT</i> Veículos híbridos e elétricos <i>Softwares</i> de navegação <i>Cloud</i> | Planos cicloviários Eletrificação do transporte público Dados abertos de mobilidade Plataformas de mobilidade em nuvem |
| Recursos Energéticos Distribuídos | Resposta da demanda Energia distribuída Otimização do sistema elétrico Armazenamento de energia | Medidores inteligentes Monitor de carga <i>Cloud</i> Painéis solares | Instalação de painéis solares em prédios públicos Projeção de demanda e gerenciamento de demanda Projeção de geração de energia renovável Micro e minigeração distribuída (MMGD) |

Fonte: Elaboração própria

Neste ponto, cabe ressaltar que, embora o fator tecnológico seja frequentemente considerado um elemento central em cidades inteligentes, este por si só pode não promover as mudanças desejáveis para uma sociedade mais eficiente, resiliente e inclusiva. O conceito e a prática devem evoluir para uma visão mais abrangente de cidade inteligente, a qual inclui como fatores-chaves, além da tecnologia, os fatores humanos (pessoas, diversidade, educação) e institucionais (política e governança).

Os fatores institucionais incluem questões regulatórias, políticas, de governança, de coordenação e definição de papel dos *stakeholders* e podem ser indutores ou barreiras para a implementação das iniciativas. Na economia circular por exemplo, pode ser fundamental a

existência de marcos regulatórios relacionados, tal como o plano de ação circular europeu, a criação de fundos de apoio, políticas de tributação e subsídio e diretrizes para gestão de resíduos. No que diz respeito às TICs, torna-se estratégica a implementação de regulações de protocolos de segurança cibernética, protocolos de interoperacionalidade de *Big Data* e a conformidade de algoritmos com a regulamentação existente no setor de energia, por exemplo. Além disso, questões institucionais e regulatórias podem ter impactos importantes nos aspectos econômicos, como na liberação de investimentos e linhas de crédito específicas.

Os fatores humanos são igualmente importantes e exercem papel cada vez mais decisivo numa cidade inteligente dado o crescente poder de escolha dos cidadãos face à interação com novas plataformas virtuais de sistemas energéticos. A decisão econômica dos agentes frente à correta sinalização de preços em conjunto com outros aspectos regulatórios é determinante na gestão de recarga de veículos elétricos ou de uso de aparelhos domésticos em residências ao longo do dia. Além disso, o potencial da transformação digital nos sistemas energéticos pode ser mais bem aproveitado caso o capital humano seja desenvolvido.

Por fim, com a crescente urbanização, digitalização e descentralização da geração de energia, a cidade inteligente ganha importância crescente para o planejamento da expansão do sistema energético nacional em conformidade com o processo de transição energética e desenvolvimento sustentável. As cidades são o *locus* de inovações tecnológicas e iniciativas que alteram as formas de produzir, consumir e se deslocar, gerando mudanças estruturais na sociedade de forma dinâmica.

Assim torna-se estratégico compreender e analisar como os fatores tecnológicos, humanos e institucionais das iniciativas preponderantes nas cidades poderão interagir gerando impactos na oferta e demanda de energia. Tais interações possibilitarão a configuração de novos desafios e oportunidades para o sistema energético no Brasil, bem como seus desdobramentos em termos de competitividade, descarbonização e impactos socioambientais.

7. Referências Bibliográficas

ABILOGAS (2020). Marco do saneamento eleva potencial do biogás em 3 milhões de m³/dia. Disponível em: <<https://bit.ly/3anyrdR>>. Acessado em 24 de Jul. 2020.

ASCIMER (2015). *Assessing Smart City Initiatives for the Mediterranean Region. Smart Cities: Concept & Challenges Deliverable*, 1A, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/34ZYdky>>. Acessado em 13 Nov. 2019.

Biogás Brasil (2021). Aplicações do biogás para geração de energia elétrica. Abril, 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/3jmYOp8>>. Acessado em 28 Abr. 2021.

CIBiogás (2021). Central de Bioenergia a Biogás em Entre Rios do Oeste (PR). Disponível em: <<https://bit.ly/2U3bNnc>> Acessado em 28 Abr. 2021.

CPFL (2020). CPFL Paulista destaca sucesso de ações sustentáveis no Dia Mundial do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://bit.ly/37oqmos>>. Acessado em 12 Ago. 2020.

C40 Cities (2020). The solar PV revolution in Brazil: How cities can take advantage. Disponível em: <<https://bit.ly/3AfvyaO>>.

DOE (2019). U.S. Department of Energy. *Grid-interactive Efficient Buildings Technical Report Series. Overview of Research Challenges and Gaps*. Dezembro de 2019. U.S. Department of Energy (DOE). Disponível em: <<https://bit.ly/3bNodDk>>. Acesso em 13 Abr. 2020.

EC (2021). European Commission. *Nzeb. Nearly zero-energy buildings*. Disponível em: <<https://bit.ly/3AdwWdU>> Acesso em: 27 de Jul. 2021.

EC (2019). European Commission. *Report from the Commission to the European Parliament, on the implementation of the Circular Economy Action Plan*. Bruxelas, 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3gOwmdj>> Acesso em 27 de Jul. 2020.

EC (2017). European Commission. *The making of a smart city: best practices across Europe*. Bélgica, 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/3kAhVMa>>. Acesso em 07 Abr. 2020.

EIA (2020). Energy Information Administration. *How much energy is consumed in U.S. buildings?* Disponível em: <<https://bit.ly/3kO8clN>> Acesso em 27 de Jul de 2020.

ELETROBRAS (2021). Resultados PROCEL 2021. Ano Bae 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/3AiiEZI>> Acesso em 28 de Jul de 2021.

EMF (2015). Ellen MacArthur Foundation. *Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition*. November, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2ZvdWq3>>. Acesso em 29 Nov. 2019.

EMF (2019). Ellen Macarthur Foundation. *The concept of a circular economy*. Disponível em: <<https://bit.ly/2ruhXhX>>. Acesso em 28 Nov. 2019.

ENEL (2020). *Futur-e. Requalification*. Disponível em: <<https://bit.ly/3fSW9QI>>. Acesso em 13 de Ago. 2020.

ENEL X (2020). *Circular Economy*. Disponível em: <<https://bit.ly/3iPdKdZ>>. Acesso em 24 de Jul. 2020.

EnGuia (2021). Calculadora de eficiência energética. Disponível em: <<https://bit.ly/2VGzan4>>. Acesso em 24 de Jul. 2020.

EPE (2018^a). Empresa de Pesquisa Energética. Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica EPE 030/2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3amFOCc>>. Acesso em 14 Abr. 2020.

EPE (2018^b). Cenários de Demanda para o PNE 2050. Relatório Parcial 2. Disponível em: <<https://bit.ly/3gUIUjs>>. Acesso em 14 Abr. 2020.

EPE (2018^c). Eletromobilidade e Biocombustíveis. Documento de Apoio ao PNE 2050. Dezembro de 2018. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <<https://bit.ly/3Cm7qov>>. Acesso em 27 Abr. 2020.

EPE (2019^a). Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético. Nota Técnica. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <<https://bit.ly/3iC5ail>>. Acesso em 12 Abr. 2020.

EPE (2019^b). Recursos Energéticos Distribuídos. Documento de Apoio ao PNE 2050. Disponível em: <<https://bit.ly/3kFIErZ>>. Acesso em 12 Nov. 2019.

EPE (2020). Avaliação Técnico-econômica de Ônibus Elétrico no Brasil. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <<https://bit.ly/3fDaaEy>>. Acesso em 27 Abr. 2021.

EPE (2020^b). O que são cidades inteligentes e sustentáveis? Série: “O papel das cidades no uso da energia”. Informe Técnico. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <https://bit.ly/3afiY0a>. Acesso em 10 Abr. 2021.

EPE (2021). Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030. Disponível em: <<https://bit.ly/3ClhoGV>>. Acesso em 29 Jul. 2021.

EPE (2022). Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031. Disponível em: <<https://bit.ly/3E2x6rG>>. Acesso em 11 de Abr. de 2022.

FEBRABAN (2017). Federação Brasileira de Bancos. Edificações Sustentáveis e Eficiência Energética. 1ª edição – fevereiro de 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2SeMQ4k>>. Acesso em 09 Abr. 2020.

Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N.; Hultink, E. (2017) *The Circular Economy - A new sustainability paradigm?* Journal of Cleaner Production 143 (2017) 757e768.

Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. (2016). *A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems.* Journal of Cleaner Production 114 (2016) 11 e 32.

Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanovic, N., & Meijers, E. (2007). *Smart Cities: Ranking of European Medium-Sized Cities.* Vienna, Austria: Centre of Regional Science (SRF), Vienna University of Technology. Disponível em: <<https://bit.ly/34VvH3t>>. Acesso em 13 Nov. 2019.

Glaeser, E. L. (2011). *O Triunfo da Cidade / Edward Glaeser; [tradução Leonardo Abramovicz].* 2.ed. – São Paulo: BEI Comunicação, 2016. ISBN 978-85-7850-136-5.

GOVERNO FEDERAL (2022). Governo Federal lança medidas de incentivo à produção e ao uso sustentável do biometano. Publicado em 22/03/2022. Disponível em: <<https://bit.ly/3jqjGft>>. Acesso em 11 de Abr. de 2022.

IEA (2016). *Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems.* OECD/IEA, Paris. Disponível em: <<https://bit.ly/3hRxiCF>>. Acesso em 22 Jun. 2020.

IEA (2020). *Buildings, a source of enormous untapped efficiency potential*. Disponível em <<https://bit.ly/3ir203J>>. Acesso em 27 de Jul. 2020.

ICLEI (2021). Recife e CELPE firmam parceria para reduzir consumo de energia do Hospital da Mulher. *12 de mar de 2021*. Disponível em: <<https://bit.ly/3fxg21N>>. Acesso em 27 de Jul. 2021.

IRENA (2016). *Renewable Energy in Cities*. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. Disponível em: <<https://bit.ly/3iBlmAl>>. Acesso em 22 de Abr. 2020.

IRENA (2019). *Artificial Intelligence and Big Data*. International Renewable Energy Agency (IRENA). Disponível em: <<https://bit.ly/3iBlmAl>>. Acesso em 22 de Abr. 2021.

METROFOR (2021). Estação Juscelino Kubitschek será o primeiro equipamento do Metrô com geração de energia solar. Disponível em: <<https://bit.ly/3ysqZJN>>. Acesso em 30 Jul. 2021.

MIT (2019). *Mobility of the Future*. Disponível em: <<https://bit.ly/2XfzAPh>>. Acesso em 30 Jul. 2020.

MMA (2020). *Projetando Edificações Energeticamente Eficientes*. Disponível em: <<https://bit.ly/3fTHRyT>>. Acesso em 27 de Jul. de 2020.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (2021). *Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. Disponível em: <<https://bit.ly/3FMKKzC>>. Acesso em 14 de Out. de 2021.

OICS (2021). *Projeto Piloto para Recuperação Energética do Biogás no Aterro da Muribeca/PE*. Disponível em: <<https://bit.ly/3fPA1Jn>>. Acesso em 29 de Ago. 2021.

Oliveira; G. (2019). *Desafios para Implantação da economia circular: estudo de caso de uma empresa de eletroeletrônicos no contexto brasileiro*. FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS - ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO DE EMPRESAS DE SÃO PAULO, 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3cOSS3o>>. Acesso em 20 Abr. 2020.

PROCEL (2020). *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. ProcelInfo – Programa Brasileiro de Etiquetagem*. Disponível em: <<https://bit.ly/2SjjaCS>>. Acesso em 08 abr.2020.

Prefeitura da Cidade de Belo Horizonte (2020). *Relatório de Acompanhamento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável de Belo Horizonte*. Disponível em: <<https://bit.ly/3xrcapw>> Acesso em 08 Abr. 2021.

Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2020). *Relatório de Progresso dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável do Município do Rio de Janeiro*. Disponível em: <<https://bit.ly/3CnADzG>> Acesso em 08 Abr. 2021.

Prefeitura de São Paulo (2020). *Relatório de Localização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Cidade de São Paulo*. Disponível em: <<https://bit.ly/3AiLOaL>> . Acesso em 29 Jul. 2021.

Prefeitura Municipal de Curitiba (2021). *Curitiba vai transformar aterro em usina de energia solar*. Disponível em: <<https://bit.ly/3CliaUI>>. Acesso em 29 Jul. 2021.

QUICKO (2021). Disponível em: <<https://bit.ly/3ixriNG>>. Acesso em 29 Jul. 2021.

RAÍZEN (2020). *Economia Circular*. Disponível em <<https://bit.ly/2CoyFVz>>. Acesso em 24 de Jul. 2020.

Tomić, T.; Schneider, D. (2018). *The role of energy from waste in circular economy and closing the loop concept – Energy analysis approach*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 98 (2018) 268–287. Acesso em 28 nov. 2019.