

Digitalização e Eficiência Energética no Setor de Edificações no Brasil

Contexto Nacional e Internacional



Imprint

Commissioned and published by:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
(GIZ) GmbH
Registered offices: Bonn and Eschborn, Germany

Project: Bilateral Energy Partnerships in Developing and
Emerging Countries

Contact: German-Brazilian Energy Partnership

SCN Quadra 01, Bloco C, Sala 1501

70711-902 Brasília – DF, Brazil

Kristina Kramer

E-mail: kristina.kramer@giz.de

Stéphanie Gomes

E-mail: stephanie.gomes@giz.de

Website: www.energypartnership.com.br

Tel.: +55 61 2101 2170

Departamento de Desenvolvimento Energético/Ministério
de Minas e Energia

Secretaria Nacional de Habitação/Ministério do
Desenvolvimento Regional

As at

31/03/2022

Design

Vaz Gontijo Consultoria, Brasilia

Edelman GmbH, Berlin

Text

Growing Energy Consultoria Ltda.

Anna Carolina Peres Suzano e Silva

George Alves Soares

João Queiroz Krause

Marcos Alexandre Izidoro da Fonseca

Maria Fatima Ludovico da Gama e Souza

Myrthes Marcele Farias dos Santos

Rodrigo Flora Calili

This document was prepared within the framework of the *German-Brazilian Energy Partnership* coordinated by the Brazilian Ministry of Mines and Energy (MME) and the German Ministry of Economics and Climate Action (BMWK), and the Energy Efficiency for Sustainable Urban Development (EEDUS) project funded by the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ). *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*, German Cooperation for Sustainable Development, is the executing agency for both.

Coordination

Kristina Kramer (GIZ)

Philipp Hoepfner (GIZ)

Stéphanie Gomes (GIZ)

Jessica Gama (GIZ)

Gabriela Kaya (GIZ)

Samira Sana Fernandes De Sousa Carmo (MME)

Alexandra Maciel (MME)

Andiara Campanhoni (MDR)

Marina Amorim Cavalcanti de Oliveira (MDR)

Amanda Alves Olalquiaga (MDR)

GIZ is responsible for the content of this publication.

On behalf of the
Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK)

Conteúdo

Glossário	5
Lista de figuras	7
Lista de quadros	8
Resumo executivo	9
Executive summary	13
1. Introdução	16
1.1. Organização do texto	16
2. Análise de soluções digitais para eficiência energética em edificações no Brasil e no mundo	18
2.1. Soluções digitais para eficiência energética em edificações por fase do ciclo de vida	19
2.2. <i>Status quo</i> da digitalização no segmento de edificações no Brasil e no mundo	72
2.3. Políticas de digitalização no segmento de edificações no Brasil e instrumentos implementados ou em desenvolvimento	79
2.4. “Inteligência” adotada na operação das edificações no Brasil e no mundo	87
3. Análise de tecnologias aplicadas à gestão da demanda predial e do entorno	88
3.1. Gestão de equipamentos eletrodomésticos, de iluminação e climatização	88
3.2. Gestão de edificações conectadas e distritos inteligentes	89
3.3. Medidores inteligentes e seu papel na gestão de edificações	93
3.4. Tecnologias digitais para certificação de edificações	100
4. Conclusões	105
Referências	109
Apêndice 1 – Nota metodológica	121
A1. Fase exploratória/descritiva	121
A2. Fase prospectiva	122
A3. Fase propositiva	123
Referências do Apêndice 1	124

Apêndice 2 – Definição das tipologias de edificações	125
Resumo da pesquisa realizada nas principais bases de referência do Setor Residencial	125
Referências do Apêndice 2	131
Apêndice 3 – Quadro geral das soluções digitais no segmento de edificações .	132
Apêndice 4 – Referências para consolidação do <i>status quo</i> de disponibilidade comercial	135

Glossário

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	CO₂	Dióxido de Carbono, Gás Carbônico
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida	CONPET	Programa Nacional de Racionalização de Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações	COP21	Conferência das Partes 2021
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	DALI	<i>Digital Addressable Lighting Interface</i> (Interface de Iluminação Digital Endereçável)
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar	EaaS	<i>Energy-as-a-Service</i> (Energia como Serviço)
BIM	<i>Building Information Modelling</i> (Modelagem da Informação da Construção)	EEDUS	Eficiência Energética para o Desenvolvimento Urbano Sustentável
BEM	<i>Building Energy Modelling</i> (Modelagem Energética da Edificação)	ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
BEN	Balanco Energético Nacional	EPE	Empresa de Pesquisa Energética
BMS	Sistemas de Gestão Predial	GEE	Gases de efeito estufa
BMWi	Ministério de Economia e Energia da Alemanha	GIZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit</i> (Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável)
BMZ	Ministério Federal da Cooperação Econômica e do Desenvolvimento da Alemanha	GT	Grupo de Trabalho
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	HIS	Habitação de Interesse Social
C&T	Ciência e Tecnologia	IAF	<i>International Accreditation Forum</i>
CA	Corrente Alternada	IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações	IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável	INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
CC	Corrente Contínua	INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
CDE	<i>Common Data Environment</i> (Ambiente de Dados Comum)	Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Fluidodinâmica Computacional)	IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética	ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
CICE	Comissão Interna de Conservação de Energia	kWh	Quilowatt-hora
CIM	<i>City Information Modelling</i> (Modelagem da Informação da Cidade)		

LGPD	Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais	PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
m²	Metro-quadrado	PPH	Pesquisa de Posses e Hábitos
M&V	Medição e Verificação	PPT	Políticas Públicas de Telecomunicações
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações	PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional	R\$	Reais
MME	Ministério de Minas e Energia	RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade
MP	Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão	RBC	<i>Rule Based Control</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i> (Contribuição Nacionalmente Determinada)	RCD	Resíduos de Construção e Demolição
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento	RED	Recursos Energéticos Distribuídos
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem	REN	Resolução Normativa
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia	RFID	Identificadores de Radiofrequência
PDEF	Plano Decenal de Eficiência Energética	RGI	Registro Geral de Imóveis
PEE	Programa de Eficiência Energética	RI	Registro da Incorporação
PEEB	<i>Programme for Energy Efficiency in Buildings</i> (Programa para Eficiência Energética em Edifícios)	ROL	Receita Operacional Líquida
PERS	Programa de Energia Renovável Social	RTQ-C	Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
PLC	<i>Power Line Communication</i>	RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
PNCI	Política Nacional de Cidades Inteligentes	SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
PNIC	Plano Nacional de Internet das Coisas	UBEM	Modelagem Energética Urbana
PNE	Plano Nacional de Energia	UH	Unidade Habitacional

Lista de figuras

Figura 1 – Linha do tempo das políticas implementadas ou em desenvolvimento no país.	79
Figura 2 – Nuvem de palavras “edificações inteligentes”	87
Figura 3 – Estrutura tarifária para consumidores de baixa tensão no Brasil	97
Figura 4 – Representação de uma matriz morfológica multidimensional aplicável a cada fase do ciclo de vida da edificação	122

Lista de quadros

Quadro 1 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de projeto	23
Quadro 2 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de construção	33
Quadro 3 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação	41
Quadro 4 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de reforma	58
Quadro 5 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de demolição	68
Quadro 6 – <i>Status quo</i> das soluções digitais para a fase de projeto	74
Quadro 7 – <i>Status quo</i> das soluções digitais para a fase de construção	75
Quadro 8 – <i>Status quo</i> das soluções digitais para a fase de operação	76
Quadro 9 – <i>Status quo</i> das soluções digitais para a fase de reforma	77
Quadro 10 – <i>Status quo</i> das soluções digitais para a fase de demolição	78
Quadro 11 – Síntese das políticas implementadas ou em desenvolvimento no país	80
Quadro 12 – Síntese dos principais motivadores para a implantação das redes inteligentes em diferentes países	99
Quadro 13 – Principais tecnologias digitais utilizadas na certificação de edifícios	102
Quadro geral das soluções digitais no segmento de edificações	132

Resumo executivo

O segmento de edificações é um dos principais consumidores de energia na matriz energética mundial. Nos países da União Europeia, por exemplo, este segmento representa cerca de 40% do consumo de energia final e 36% das emissões de CO₂. No Brasil, é o terceiro maior consumidor de energia total e o primeiro de energia elétrica. As edificações residenciais, comerciais e públicas respondem por cerca de 15% do consumo de energia total e 51% do consumo de eletricidade.

A transformação digital no segmento de edificações, como em todos os demais, vem se tornando cada vez mais presente no cotidiano e possibilitando coletar, armazenar, estruturar, organizar e processar dados de forma inédita. O conjunto de dados disponíveis é analisado e relacionado com contextos específicos, gerando informações úteis para a sistematização de processos de forma cada vez mais otimizada. Entre as funções para as quais a digitalização pode contribuir está a eficiência energética.

Os aspectos abordados nesse estudo apresentam complexidade intrínseca na medida em que o segmento de edificações é composto de diversas realidades e agentes, como incorporadoras, construtoras, escritórios de projetos, administradores de edifícios, usuários, fornecedores e fabricantes de materiais e prestadores de serviço. Cada categoria de ator traz consigo sua própria diversidade em relação a porte, objetivos específicos, condições financeiras, desafios específicos, que influenciam na sua adoção de tecnologias no cotidiano. Esta complexidade se eleva por ainda estar inserida em um ambiente regulatório bastante heterogêneo, um alto nível de informalidade e o setor da construção civil ser mundialmente conhecido como conservador na adoção de novas tecnologias.

Na avaliação das tecnologias digitais por fase do ciclo de vida da edificação (projeto, construção, operação, reforma e demolição) e por tipologia (comercial, pública, residencial unifamiliar, residencial multifamiliar e habitações de interesse social), vinte foram selecionadas, de forma não exaustiva, e são descritas e analisadas para cada fase e tipologia mencionadas.

A seleção das soluções digitais abrangeu:

- i. As tecnologias de gestão e automação como sensores, atuadores e interruptores inteligentes, Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI), fachadas Inteligentes e outros sistemas, assistentes virtuais, aplicativos e controles inteligentes, tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos,

equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede, sistemas de gestão predial (BMS) e aplicativos de resposta da demanda, conscientização e gamificação, que são predominantemente aplicadas na fase de operação onde ocorre 80% do consumo de energia das edificações;

- ii. Os programas computacionais de simulação e avaliação como Modelagem Energética da Edificação (BEM – na sigla em inglês, *Building Energy Modelling*), Fluidodinâmica Computacional (CFD – na sigla em inglês, *Computational Fluid Dynamics*), Simulação de iluminação natural e artificial, Sistemas de Gestão de Portfólio Energético; Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, que são muito aplicados na fase de projetos e possibilitam edificações energeticamente mais eficientes e sustentáveis;
- iii. As tecnologias de gerenciamento e segurança dos dados como *Blockchain* e Computação em Nuvem;
- iv. As tecnologias que aumentam a produtividade como impressão 3D, Softwares de Gerenciamento Ágil (*Agile*) e Realidade Aumentada; e a tecnologia Modelagem da Informação da Construção (BIM – na sigla em inglês, *Building Information Modelling*) que funciona como um modelo virtual tridimensional e colaborativo da edificação, com informações específicas associadas a cada elemento inserido tanto no aspecto construtivo como no de materiais.

A descrição e aplicação dessas tecnologias por fase do seu ciclo de vida e tipologia são apresentadas nos itens 2.1.1 a 2.1.5.

Para as soluções digitais selecionadas, é realizada uma avaliação de status quo, baseada em disponibilidade comercial de produtos e serviços associados, no Brasil e em outros países, consolidadas em matrizes relacionais (nos itens 2.2.1 a 2.2.5) embasadas em referências acadêmicas e comerciais (relacionadas ao quadro sintético apresentado no Apêndice 3).

Depreende-se desta avaliação, que, na fase de projeto há disponibilidade comercial de produtos e serviços relacionados a Modelagem da Informação da Construção, diferentes categorias de simulação, além de softwares específicos para Avaliação do Ciclo de Vida, gerenciamento ágil e sistemas de realidade aumentada. Na fase de construção excluem-se as tecnologias de simulação, mantendo-se as demais apresentadas e, internacionalmente aparecem disponíveis tecnologias de Impressão 3D e *Blockchain* (no Brasil ainda em desenvolvimento). Para a fase de operação, evidencia-se a disponibilidade comercial de soluções capazes de fomentar o controle e automação de processos e serviços, tais como sensores e atuadores, DALI, assistentes virtuais, aplicativos e controles inteligentes, tomadas inteligentes, carregadores de veículos elétricos, interruptores inteligentes e equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede. A fase de reforma reproduz o status quo da fase de projeto, adicionado de soluções em Impressão 3D, disponíveis em nível internacional e em desenvolvimento no contexto nacional. Na fase de demolição, identificou-se o oferecimento de produtos e serviços para BIM, ACV, Gerenciamento Ágil e Realidade Aumentada no contexto nacional, adicionados de *Blockchain* na esfera internacional.

As políticas e instrumentos regulatórios implementados ou em desenvolvimento no Brasil associados a eficiência energética e digitalização no segmento de edificações abrangem três grandes vertentes: políticas de Eficiência Energética que possam impactar o segmento de Edificações; instrumentos regulatórios relacionados às Redes Elétricas Inteligentes que possam ampliar a Digitalização neste segmento; e políticas diretamente ligadas à Digitalização nas Edificações, conforme apresentado no item 2.3.

O arcabouço legal relacionado à eficiência energética teve início na década de 80 e vem se aperfeiçoando ao longo do tempo, sendo minuciosamente descrito neste estudo. Na área de eficiência energética em edificações, destacam-se PROCEL Edifica e PBE Edifica, que são subprogramas respectivamente do Programa Nacional de Conservação de Energia e Programa Brasileiro de Etiquetagem. O caráter transversal da eficiência energética induz que diversos órgãos governamentais tenham iniciativas de eficiência energética mais relacionados com os seus setores de atuação como as do Ministério da Economia e Ministério de Desenvolvimento Regional.

Os instrumentos regulatórios implantados e em desenvolvimento em redes elétricas Inteligentes, medidores inteligentes, geração distribuída, mecanismos tarifários de resposta da demanda, abertura do mercado de energia elétrica, flexibilidade e digitalização do setor elétrico em termos de precificação horária, internet das coisas; cidades inteligentes e disseminação da Modelagem da Informação da Construção (BIM) são, definitivamente, elementos que, em conjunto com as tecnologias aqui descritas, impulsionarão a digitalização do segmento de

edificações. Todos estes aspectos são objeto de análise deste estudo.

Percebe-se que mesmo com este forte arcabouço construído e em desenvolvimento, a transversalidade e complexidade de implementações de digitalização em edificações exigem mais robustez e fortalecimento da coordenação para se tornar eficaz e sinérgica. Recomendações de ações de políticas públicas serão objeto do próximo relatório.

A gestão de demanda de eletrodomésticos e dos sistemas de iluminação e climatização pode objetivar a redução de consumo de energia ou a redução dos custos relativos à demanda na conta de energia elétrica. Ambas são dependentes do ambiente regulatório a que estão submetidas as edificações associadas. Para economia de energia, três famílias de tecnologia se destacam: a de medição de energia; a de gerenciamento da energia; e a tecnologia intrínseca aos equipamentos (se são eficientes e se permitem gerenciamento). No âmbito das duas primeiras famílias, relevam-se as tecnologias como BMS, sensores, atuadores e interruptores inteligentes, assistentes virtuais, aplicativos e controles inteligentes, tomadas inteligentes e DALI. Tais tecnologias digitais atuam tanto no controle para consumir menos energia, como na mudança de hábitos dos usuários. Aplicativos e controles inteligentes dão visibilidade às informações de consumo e orientam os usuários a poupar energia. Os controles inteligentes, assistentes virtuais e interruptores inteligentes facilitam o controle desses equipamentos. O gerenciamento de edificações mais complexas, como comerciais e públicas se utilizam das tecnologias BMS e DALI.

Em relação a equipamentos e sistemas propriamente ditos, a tecnologia digital emergente de equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede associa as soluções de comunicação e controle remoto aos eletrodomésticos, o que facilita sua integração com tecnologias de gerenciamento mencionadas. As tomadas e interruptores inteligentes possibilitam que eletrodomésticos e sistemas que não sejam produzidos com a inteligência embarcada possam também ser controlados.

Desta forma, conclui-se que a economia de energia tem seu potencial fortemente impulsionado pelas tecnologias digitais, possibilitando vencer os desafios de mudança de hábitos do usuário, gerenciamento automático das cargas e monitoramento online do consumo.

A gestão da demanda para minimizar os custos com energia elétrica depende fortemente da regulação do sistema de energia elétrica ao qual a edificação está inserida. Atualmente no Brasil, o grupo tarifário B possui tarifa monômnia e, opcionalmente, a tarifa branca. Nos consumidores do grupo tarifário A com tarifa binômnia onde se encontram grandes shoppings e edifícios comerciais e

públicos, as tecnologias que gerenciam as suas cargas são imprescindíveis, principalmente, aquelas conectadas aos sistemas de climatização que nestes edifícios, correspondem geralmente a mais de 30% do consumo. As tecnologias de sistemas de gestão predial e de sensores, atuadores e interruptores inteligentes são essenciais para esta gestão.

Quando as edificações são analisadas em conjunto como em distritos, percebe-se uma nova camada de possibilidades de otimização e compartilhamento, a partir da adoção de tecnologias específicas e/ou da integração entre elas, bem como na possibilidade de gestão compartilhada de ativos. Projetos específicos de integração ou acompanhamento criterioso de reformas ou novas construções no conjunto são primordiais, exemplos de sistemas que podem ter suas viabilidades econômicas reforçadas são sistemas de geração de energias renováveis, aquecimento solar térmico, sistemas compartilhados de fornecimento de água quente, tanques de termoacumulação, sistemas de fornecimento de água gelada e/ou fluidos refrigerantes (para condicionamento de ar), sistemas de captação tratamento e armazenamento de águas de chuva e ou águas residuais. Para tanto, as tecnologias relacionadas à simulação são essenciais, como BEM, Modelagem Energética Urbana (UBEM), CFD, simulação de iluminação natural, ACV e programas de simulação e gerenciamento de portfólio energético. Na fase de operação, destacam-se as tecnologias de gestão da informação, controle e automação como computação em nuvem, BIM, gestão de portfólio energético, *Blockchain*, seus contratos inteligentes, inteligência artificial e os hardwares associados (sensores, atuadores e interruptores inteligentes); ferramentas de informação ao usuário e gamificação, tomadas inteligentes e carregadores de carros elétricos.

A medição inteligente desempenha um papel importante na aceleração da digitalização em edificações. Pontua-se que as tecnologias de medição inteligente não se restringem aos medidores de energia elétrica. Uma infraestrutura de medição inteligente deve ser composta por equipamentos que medem grandezas energéticas e por sistemas e softwares que armazenam, gerenciam e analisam os dados medidos. As aplicações das tecnologias de medição ocorrem geralmente na fase de operação, fase em que ocorre o maior consumo de energia, e abrangem todas as tipologias de edificação. Nas habitações de interesse social, os medidores eletrônicos se restringem ao atendimento de alguns projetos de regime tarifário diferenciado. As experiências internacionais de instalação de medidores inteligentes nas edificações estudadas nos EUA, União Europeia, Alemanha e Reino Unido mostram o êxito na aplicação destes equipamentos em qualquer edificação, sem distinção de tipologia. Isto possibilita uma melhor gestão e operação dos recursos energéticos nestes países. O mercado de medidores inteligentes tem um grande potencial de crescimento no país, graças ao arcabouço regulatório vigente, trazendo também a

oportunidade de alavancar o mercado de outras tecnologias de medição inteligente.

No que concerne à tecnologia para certificação de edifícios, o avanço das tecnologias de captura e transmissão de imagens e documentos, *Blockchain*, segurança de dados, entre outras, possibilitam a digitalização de vários processos de certificação e a criação de plataformas digitais para suportar as principais certificações existentes como a Etiquetagem PBE Edifica, LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), EDGE (*Excellence In Design for Greater Efficiencies*), WELL *Building Standard*, BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*), e o AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental - *Haute Qualité Environnementale*).

As atividades de auditoria remota preconizadas pela Norma ABNT ISO 19.011 - Diretrizes para auditoria de sistemas de gestão, de dezembro de 2018 se realizam por tecnologias de comunicação interativas integradas às de segurança de dados na condução de entrevistas, na observação remota do trabalho realizado, no preenchimento de listas de verificação e questionários e na condução de análise crítica documental com a participação do auditado. As auditorias energéticas utilizam diversos aplicativos e softwares para automatizar e agilizar seus processos reduzindo tempo e custo.

Em relação às tipologias de edifícios, a certificação, suas plataformas digitais e as inspeções remotas podem ser utilizadas para todas as tipologias. A adoção de uma certificação é geralmente impulsionada por um arcabouço regulatório mandatário. Este não é o caso brasileiro. Ressalta-se que as tecnologias digitais por trazer agilidade, confiabilidade e redução de recursos humanos e financeiros, notadamente nas inspeções remotas, podem se constituir em um grande impulsionador das certificações voluntárias no país., que hoje não são massivamente adotadas devido a barreiras de como ausência de conhecimento, falta de tempo, alto custo para pequenas edificações entre outras.

Como conclusão geral deste estudo, pode-se afirmar que existe um grande potencial de utilização das soluções digitais em edificações. Para cada fase do ciclo de vida de edificações e tipologia, há diferentes agentes envolvidos com diferentes barreiras e desafios. As vinte tecnologias selecionadas devem impulsionar o impacto da digitalização no aumento da eficiência energética em edificações com destaque para sensores, atuadores, tomadas e interruptores inteligentes, BIM, BEM, *Blockchain*, assistentes virtuais, ferramentas de gerenciamento Ágil e sistemas de gestão predial. A tendência mundial de utilização crescente das tecnologias digitais em diversos setores da economia, a redução do consumo de insumos energéticos, a modernização do setor elétrico, a redução dos custos de serviços e equipamentos das soluções digitais, o

comportamento mais atento dos consumidores em relação à eficiência energética facilitada por um maior acesso às informações e melhor controle são os grandes impulsionadores deste crescente mercado nacional num futuro próximo.

De forma a contribuir para o debate sobre as possíveis trajetórias evolutivas dos condicionantes da digitalização no segmento de edificações em médio e longo prazos e subsidiar a formulação ou revisão de políticas públicas, na fase prospectiva deste estudo serão construídos três cenários referentes ao potencial de eficiência energética decorrente da digitalização no segmento de edificações no Brasil, preconizada segundo três ritmos de implementação – lenta, moderada ou rápida.

Executive summary

The building segment is one of the main energy consumers in the world energy matrix. In the European Union countries, for example, this segment accounts for about 40% of final energy consumption and 36% of CO₂ emissions. In Brazil, it is the third largest consumer of total energy and the first of electricity. Residential, commercial and public buildings account for about 15% of total energy consumption and 51% of electricity consumption.

The digital transformation in the building segment, like all the others, has become increasingly present in everyday life and making it possible to collect, store, structure, organize and process data in an unprecedented way. The available data set is analyzed and related to specific contexts, generating useful information for processes systematization in an increasingly optimized way. Among the functions to which digitalization can contribute is energy efficiency.

The aspects addressed in this study present intrinsic complexity in that the building segment is composed of several realities and agents, such as developers, builders, project offices, building managers, users, material suppliers and manufacturers, and service providers. Each actor category brings its own diversity with regard to size, specific objectives, financial conditions and specific challenges which influence their technologies adoption in everyday life. This complexity rises because it is still inserted in a fairly heterogeneous regulatory environment, a high level of informality and the construction sector is worldwide known as conservative in the adoption of new technologies.

In the evaluation of digital technologies by the life cycle phase of the building (design, construction, operation, renovation and demolition) and by typology (commercial, public, single-family residence, multi-family residence and social interest housing), twenty were selected, in a non-exhaustive way, and are described and analyzed for each phase and typology mentioned.

The selection of the digital solutions that are comprised of:

- i. A management and automation technologies, such as sensors, actuators, smart switches and Digital Addressable Lighting Interface (DALI), smart facades and other systems, virtual assistants, applications, and smart controls, smart plugs and electric vehicles chargers, smart electronic equipment, connected to the network, and building management systems (BMS), and demand response applications, awareness and gamification, which are mainly applied in the operation phase, where 80% of the energy consumption of the building takes place;
- ii. All computer programs for simulation and analysis such as Building Energy Modelling, Computational Fluid Dynamics (CFD), Natural and Artificial Lighting Simulation, Energy Portfolio Management Systems; Life Cycle Assessment Software – LCA, which are widely applied in the project phase and enable more energy efficient and sustainable buildings;
- iii. Data management and security technologies such as Blockchain and Cloud Computing;
- iv. Productivity-enhancing technologies such as 3D printing, Agile Management Software and Augmented Reality; and Building Information Modeling (BIM) technology, that works as a three-dimensional and collaborative virtual model of the building, with specific information associated with each element inserted both in the constructive aspect and in the material aspect.

The description and application of these technologies by their life cycle phase and typology are presented in items 2.1.1 to 2.1.5.

For the selected digital solutions, a status quo assessment is performed, based on commercial availability of associated products and services, in Brazil and other countries, consolidated in relational matrices (in items 2.2.1 to 2.2.5) based on academic and commercial references (related to the summary table presented in Appendix 3).

It follows from this evaluation that in the design phase there is commercial availability of products and services related to Building Information Modeling, different categories of simulation, in addition to Software specific for Lifecycle Assessment, agile management and augmented reality systems. In the construction phase, simulation technologies are excluded, keeping the others presented and, internationally, 3D printing technologies and Blockchain are available (still in development in Brazil). For the operation phase, it is evident the commercial availability of solutions capable of promoting the control and automation of processes and services, such as sensors and actuators, DALI, virtual assistants, smart applications and controls, smart plugs, electric vehicle chargers, smart

switches and smart electronic equipment connected to the network. The renovation phase reproduces the status quo of the design phase, with 3D printing solutions added, available internationally and under development in the national context. In the demolition phase, we identified the offer of products and services for BIM, LCA, Agile Management and Augmented Reality in the national context, added of Blockchain in the international sphere.

The policies and regulatory instruments implemented or under development in Brazil associated with energy efficiency and digitalization in the building segment cover three main areas: Energy Efficiency policies that can impact the Building segment; regulatory instruments related to Smart Electrical Networks that can expand Digitalization in this segment; and policies directly linked to Digitalization in Buildings, as presented in item 2.3.

The legal framework related to energy efficiency began in the 80s and has been improving over time, being thoroughly described in this study. With regard to energy efficiency in buildings, PROCEL Edifica and PBE Edifica stand out, which are subprograms respectively from the National Energy Conservation Program and the Brazilian Labeling Program. The transversal nature of energy efficiency induces several government agencies to have energy efficiency initiatives more related to their activity sectors such as those of the Ministry of Economy and Ministry of Regional Development.

The regulatory instruments that are deployed and developed in smart grids, smart meters, distributed generation, pricing mechanisms for demand response, the opening of the electricity market, flexibility and the digitalization of the energy sector in terms of hourly pricing, internet of things, smart cities, and the spread of the Building Information Modeling (BIM), are definitely the elements which, jointly with the technologies described here, will drive the digitalization of the building segment. All these aspects are the subject of analysis in this study.

It is noticed that even with this strong framework built and under development, the transversality and complexity of digitalization implementations in buildings require more robustness and coordination strengthening to become effective and synergistic. Recommendations for public policy actions will be the subject of the next report.

The demand management of household appliances and lighting and air conditioning systems can aim reduce energy consumption or the reduction of the demand-related costs on the electricity bill. Both are dependent on the regulatory environment to which the associated buildings are subjected. For energy saving, three technology families stand out: the energy measurement; the energy management; and the technology intrinsic to the equipment (if they are efficient and allow management). Within the first two families, technologies such as BMS, sensors, actuators and smart switches, virtual assistants,

smart applications and controls, smart plugs and DALI are highlighted. Such digital technologies act both in the control to consume less energy, as in the change of user's habits. Smart apps and controls give visibility to consumer information and guide users to save energy. Smart controls, virtual assistants and smart switches make it easy to control this equipment. The management of more complex buildings, such as commercial and public, uses BMS and DALI technologies.

In relation to equipment and systems themselves, the emerging digital technology of smart electronic equipment connected to the network associates communication and remote control solutions with household appliances, which facilitates their integration with the mentioned management technologies. Smart plugs and switches make it also possible to control appliances and systems that are not produced with embedded intelligence.

Thus, it is concluded that energy saving has its potential strongly driven by digital technologies, making it possible to overcome the challenges of changing user habits, automatic charge management and online consumption monitoring.

Demand management to minimize electricity costs depends heavily on the regulation of the electricity system to which the building is inserted. Currently in Brazil, tariff group B has a monomial tariff and, optionally, the white tariff. In the tariff A consumers group with binomial tariff where large shopping malls and commercial and public buildings are located, the technologies that manage their charges are essential, especially those connected to the air conditioning systems that in these buildings, generally correspond to more than 30% of consumption. The building management systems and smart sensors, actuators and switches technologies are essential for this management.

When buildings are analyzed together as in districts, a new optimization layer and sharing possibilities is perceived, from the adoption of specific technologies and/or integration between them, as well as the possibility of shared asset management. Specific projects of integration or careful monitoring of renovations or new constructions are fundamental, examples of systems that may have their economic viability reinforced are renewable energy generation systems, solar thermal heating, shared hot water supply systems, thermal storage tanks, cold water supply systems and/or cooling fluids (for air conditioning), rainwater harvesting or waste water treatment systems. Therefore, simulation-related technologies are essential, such as Urban Energy Modeling (UBEM), CFD, natural lighting simulation, LCA and simulation and energy portfolio management program. In the operation phase, these technologies stand out, such as information management, control and automation, cloud computing, BIM, energy portfolio management, Blockchain, its smart contracts, artificial intelligence and the associated hardware (smart sensors, actuators and switches); user information and gamification tools, smart plugs and electric car chargers.

Smart metering plays an important role in accelerating digitalization in buildings. It is pointed out that smart metering technologies are not restricted to electricity meters. A smart metering infrastructure should consist of equipment that measures energy quantities and systems and Software that stores, manages and analyzes the measured data. The applications of measurement technologies generally occur in the operation phase, the phase in which the greatest energy consumption occurs, and cover all types of building. In social interest housing, electronic meters are restricted to the service of some projects of differentiated tariff regime. The international experiences of installing smart meters in the buildings studied in the USA, European Union, Germany and the United Kingdom show the success in the application of these equipment in any building, without typology distinction. This enables better management and operation of energy resources in these countries. The smart meter market has a great potential for growth in the country, thanks to the current regulatory framework, also bringing the opportunity to leverage the market for other smart metering technologies

With regard to building certification technology, the advancement of image and document capture and transmission technologies, Blockchain, data security, among others, enable the digitalization of several certification processes and the creation of digital platforms to support the main existing certifications such as PBE Edifica Labeling, LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), EDGE (Excellence In Design for Greater Efficiencies), WELL Building Standard, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), and the AQUA-HQE (High Environmental Quality - Haute Qualité Environnementale).

The remote audit activities recommended by the ABNT ISO 19.011 standard-guidelines for audit of management systems, of December 2018, are carried out by interactive communication technologies integrated with data security by conducting interviews, remote observation of the work carried out, the filling of checklists and questionnaires and carrying out critical documental analysis with the

participation of the audited. Energy audits use different applications and Software to automate and streamline the processes, reducing time and cost.

With regard to building typologies, certification, its digital platforms and remote inspections can be used for all typologies. The adoption of a certification is usually driven by a mandatory regulatory framework. This is not the case in Brazil. It is noteworthy that digital technologies aiming at agility, reliability and reduction of human and financial resources, especially in remote inspections, can constitute a major driver of voluntary certifications in the country, which today are not massively adopted due to barriers such as lack of knowledge, lack of time, high cost for small buildings, among others.

As a general conclusion of this study, it can be stated that there is a great potential for the use of digital solutions in buildings. For each phase of the building life cycle and typology, there are different agents involved with different barriers and challenges. The twenty selected technologies should boost the impact of digitalization on increasing energy efficiency in buildings with emphasis on smart sensors, actuators, plugs and smart switches, BIM, BEM, Blockchain, virtual assistants, agile management tools and building management systems. The global trend of increasing use of digital technologies in several sectors of the economy, the reduction of energy input consumption, the modernization of the electricity sector, the reduction of digital solutions services and equipment costs, the more attentive behavior of consumers regarding energy efficiency facilitated by greater access to information and better control are the great drivers of this growing national market in the near future.

In order to contribute to the debate on the possible evolutionary trajectories of the digitalization conditions in the building segment in the medium and long term and to subsidize the formulation or revision of public policies, in the prospective phase of this study, three scenarios will be constructed regarding the energy efficiency potential arising from digitalization in the building segment in Brazil, recommended according to three implementation rhythms – slow, moderate or fast.

1. Introdução

Mundialmente, o segmento de edificações é um dos principais consumidores de energia. Nos países da União Europeia, por exemplo, este segmento representa cerca de 40% do consumo de energia final e 36% das emissões de CO₂ [1]. No Brasil, é o terceiro maior consumidor de energia total e o primeiro de energia elétrica. As edificações residenciais, comerciais e públicas respondem por cerca de 15% do consumo de energia total e 51% do consumo de eletricidade.

A demanda gerada pelo crescimento demográfico, urbano e econômico resulta na construção de novos empreendimentos, muitas vezes edificações cada vez maiores e mais complexas, que contribuirão com o aumento das taxas de emissões de gases efeito estufa (GEE) e do consumo de energia elétrica por habitante. Essa tendência aponta para a urgência de se aumentar a eficiência energética das edificações, em todas as etapas do ciclo de vida, particularmente nas fases de projeto, construção e operação. O estudo intitulado “Inteligentes e eficientes - Soluções digitais para economia de energia em edifícios”, publicado recentemente pelo *Programme for Energy Efficiency in Buildings* (PEEB), apontou que a difusão de tecnologias digitais no segmento de edificações pode evitar 8-10% das emissões de energia esperadas para edifícios até 2030 [2].

A eficiência energética é considerada um vetor de desenvolvimento técnico, econômico, ambiental e social do país, contribuindo para o uso racional dos recursos naturais e para a segurança energética. Em particular no segmento de edificações, o grande potencial para redução do consumo de energia em edifícios com emprego de soluções digitais ainda é pouco explorado.

Tecnologias digitais podem contribuir para a eficiência energética durante todo o ciclo de vida de uma edificação, como será demonstrado no presente estudo. Na etapa de projeto, definem-se parâmetros da edificação que determinam seu desempenho energético por anos, contemplando-se domínios como envoltória, iluminação, climatização, dentre outros. Novos desenvolvimentos como os sistemas conhecidos como Modelagem da Informação da Construção (BIM) podem definir a estratégia de melhoria da eficiência energética das edificações comerciais, públicas e residenciais nas diversas fases do ciclo de vida. Além disso, a digitalização na fase de construção pode contribuir para a padronização de componentes e processos de construção na perspectiva de ganhos de eficiência energética, ao se aplicar as soluções digitais em larga escala a um custo mais acessível, inclusive para as habitações de interesse social.

Com a transformação digital no segmento de edificações, espera-se a intensificação do uso de *medidores inteligentes*

capazes de fornecer um fluxo de energia e informações bidirecional, que quando utilizados em escala e associados a sistemas adequados de tarifação e despacho inteligente possibilitam que *redes inteligentes* melhorem a confiabilidade da rede, a segurança e a eficiência de todo o sistema elétrico.

O estudo foi elaborado no âmbito da Parceria Energética Brasil-Alemanha e do projeto Eficiência Energética para o Desenvolvimento Urbano Sustentável (EEDUS), que tem como objeto o atendimento às demandas criadas pelo Grupo Técnico para Eficientização de Energia em Edificações (GT-Edificações), vinculado ao Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) do Ministério de Minas e Energia (MME), com relação ao papel e ao potencial das tecnologias digitais associadas à eficiência energética no segmento de edificações em nível nacional.

O objetivo desse estudo é identificar e sistematizar soluções e aplicações digitais para edificações residenciais, comerciais e públicas, em relação a diferentes segmentos do mercado e considerando todo o ciclo de vida do edifício, com o fim de oferecer uma base para a formulação de políticas públicas que visam o aumento da eficiência energética do segmento de edificações, por meio da transformação digital [3]. Para atingir esse objetivo geral, concebeu-se uma metodologia em três fases – exploratório-descritiva, prospectiva e propositiva. No Apêndice 1 deste documento, descreve-se a metodologia geral do estudo, ressaltando-se que os resultados apresentados no presente relatório se referem à primeira fase do estudo. Os resultados das fases prospectiva e propositiva serão objeto do relatório final deste estudo.

1.1 Organização do texto

Este relatório está estruturado em quatro capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo 2, analisam-se inicialmente as soluções digitais para eficiência energética em edificações no Brasil e no mundo, por fase do ciclo de vida e tipologia dos edifícios. Na sequência, apresenta-se o *status quo* da digitalização no segmento de edificações no

Brasil e no mundo, considerando três níveis de aptidão tecnológica e sintetizam-se as políticas de digitalização no segmento de edificações no Brasil, incluindo instrumentos já implementados ou em desenvolvimento. Ao final, aborda-se como a “inteligência” da operação das edificações vem sendo adotada no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3, analisam-se as tecnologias aplicadas à gestão da demanda predial e do entorno, focalizando-se a gestão de equipamentos eletrodomésticos, de iluminação e climatização, a gestão de edificações conectadas, redes inteligentes e o emprego de tecnologias de medição inteligente por fase do ciclo de vida e tipologia de edificações. Embora, a medição inteligente relacionada ao faturamento de energia ocorra na fase de operação, existe a possibilidade de uso destas tecnologias para a finalidade de economia de energia em outras fases como nos canteiros de obra na fase de construção. Em seguida, apresenta-se uma síntese do mercado nacional de medidores inteligentes e relatam-se experiências internacionais na implementação dos sistemas de monitoramento e gestão inteligente (*smart metering*). Finaliza-se este capítulo com uma análise sobre as tecnologias digitais que vêm sendo utilizadas no processo de certificação de edificações, com especial ênfase à aplicação de tecnologias de inspeção remota, conforme diretrizes estabelecidas na Norma ABNT NBR ISO 19011:2018 – Diretrizes para auditoria de sistemas de gestão – Versão corrigida: 2019 [4].

Finalmente, o Capítulo 4 sintetiza as conclusões das análises apresentadas nos Capítulos 2 e 3.

O Apêndice 1 resume a metodologia geral do estudo, descrevendo cada uma das fases de seu desenvolvimento. Os Apêndices 2 e 3 referem-se, respectivamente, à definição das tipologias e ao quadro-resumo das soluções digitais analisadas no Capítulo 2. As referências de fornecedores que subsidiaram a estratificação do *status quo* das tecnologias digitais no Brasil e no mundo se encontram no Apêndice 4.

2. Análise de soluções digitais para eficiência energética em edificações no Brasil e no mundo

A transformação digital vem se tornando cada vez mais presente no cotidiano e possibilitando coletar, armazenar, estruturar, organizar e processar dados de forma inédita. O conjunto de dados disponíveis é analisado e relacionado com contextos específicos, gerando informações úteis para a sistematização de processos de forma cada vez mais otimizada.

Processos estruturados e estáveis são passíveis de automação, reduzindo a necessidade de interação humana, em atividades repetitivas ou de controle complexo, arriscado ou penoso, o que libera tempo para o desenvolvimento de atividades intelectuais e minimiza falhas sem perder produtividade. Quando processos envolvem múltiplas instâncias ou *stakeholders* ocorrem transações que requerem registro adequado e relações ditadas por contratos, normas, regulamentos, leis, etc., que se traduzem em regras programáveis em contratos inteligentes, que precisam oferecer rastreabilidade, confiabilidade, segurança e auditabilidade.

O segmento de edificações, como todos os demais, vem gradualmente sendo foco do desenvolvimento de inúmeras estratégias, tecnologias e soluções digitais, que se aplicam a todas as fases do seu ciclo de vida e, em maior ou menor grau, às diversas tipologias em que pode ser classificado. Entre as funções para as quais a digitalização pode contribuir está a eficiência energética.

As tipologias e fases do ciclo de vida a serem abordadas neste estudo foi objeto de análise pela equipe técnica e a estrutura proposta, compreendendo cinco tipologias e cinco fases, foi validada pela coordenação deste estudo. Foram analisadas ao todo 11 referências nacionais e quatro internacionais, tendo sido constatada a falta de padronização da classificação das tipologias de edificações. Alguns referenciais analisados agruparam a fase de reforma com a de demolição. Decidiu-se separá-las pela utilização distinta das tecnologias digitais e pelas próprias especificidades destas fases. Em relação às tipologias do setor residencial, foi necessário um estudo à parte, que resultou na definição de três tipologias: unifamiliar,

multifamiliar e habitações de interesse social (HIS). O Apêndice 2 apresenta os resultados da análise das classificações de edificações.

É importante ressaltar que a digitalização é na realidade uma camada adicional para a melhoria do desempenho e da eficiência energética em edificações, auxiliando a otimização e provendo informações úteis e estruturadas para auxiliar os profissionais do ramo a conceber, viabilizar e implementar melhores soluções, mas não substitui abordagens e técnicas de projeto passivas, fundamentalmente nas etapas de projeto e construção.

É durante a fase de operação que as edificações mais emitem carbono e consomem energia e outros recursos, ao longo do seu ciclo de vida, seguida pela fase de construção, de modo que é senso comum que qualquer abordagem que vise à melhoria da eficiência energética tem foco na operação, embora seja desejável pensar em processos construtivos que mitiguem o consumo de recursos nas demais etapas.

Este capítulo reúne as análises sobre soluções digitais para eficiência energética em edificações no Brasil e no mundo, por fase do ciclo de vida e tipologia dos edifícios. Na sequência, apresenta o *status quo* da digitalização no segmento de edificações no Brasil e no mundo, considerando três níveis de aptidão tecnológica e sintetiza as políticas de digitalização no segmento de edificações no Brasil, incluindo instrumentos já implementados ou em desenvolvimento. Ao final, aborda como a “inteligência” da operação das edificações vem sendo adotada no Brasil e no mundo.

2.1 Soluções digitais para eficiência energética em edificações por fase do ciclo de vida

Esta seção trata do mapeamento de soluções digitais aplicáveis a cinco tipologias de edificações adotadas neste trabalho, em cada uma das fases dos seus respectivos ciclos de vida. Para tanto, optou-se pelo emprego da técnica de análise morfológica, cuja premissa fundamental é a de decompor um problema complexo em variáveis. A lógica da decomposição do problema é lidar com questões menos complexas do que o sistema original, possibilitando, desse modo, uma análise mais profunda das partes. Maiores detalhes estão apresentados no Apêndice 1 - Nota metodológica.

As edificações foram decompostas em sete domínios principais, que impactam no consumo de energia das edificações ao longo do seu ciclo de vida, a saber: envoltória; AVAC; iluminação; aquecimento de água, equipamentos e cargas de tomada; infraestrutura predial; e fornecimento, geração e armazenamento de energia. Estes domínios foram relacionados com as cinco tipologias de edificação adotadas para este estudo, gerando uma matriz morfológica para cada fase do ciclo de vida dos edifícios: projeto; construção; operação; reforma e demolição. As células de correlação entre domínios e tipologias foram então preenchidas com tecnologias e soluções digitais obtidas a partir da literatura e da experiência dos profissionais envolvidos na elaboração do trabalho. As vinte tecnologias e soluções digitais levantadas estão consolidadas no Apêndice 3 - Quadro geral das soluções digitais no segmento de edificações e são resumidamente descritas a seguir.

Modelagem da Informação da Construção (BIM)

Trata-se de um processo amplo e multidisciplinar para o registro e gerenciamento estruturado de informações diversas, acerca de uma edificação. Funciona como um modelo virtual tridimensional detalhado (níveis mínimos de detalhamento são internacionalmente discutidos e há iniciativas de construção de bibliotecas, de modo a facilitar a uniformização) e colaborativo (principalmente a partir de protocolos de interoperabilidade) da edificação, com informações específicas associadas a cada elemento inserido tanto no aspecto construtivo como no de materiais.

Modelagem Energética da Edificação (BEM)

Tem como objetivo a utilização de ferramentas específicas para simulações relacionadas à energia, seja ela térmica ou elétrica. Sua aplicação primária no setor de edificações é a estimativa do consumo de energia elétrica ao longo da operação de determinada edificação.

Para tal, são calculadas as demandas de todos os sistemas que demandam eletricidade, como iluminação, cargas de tomada e AVAC. As simulações podem ser realizadas com um modelo tridimensional simplificado, sem mobília ou instalações inseridas. Contudo, deve-se atentar à precisão nas dimensões dos cômodos e dos seus equipamentos existentes, com carga inserida a partir da média por metro quadrado (m²).

Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Simulação numérica computacional para análise do comportamento de fluidos (como o ar) em processos ou ambientes, com transmissão de calor ou transporte de massa, reações químicas e outros fenômenos relacionados. Baseia-se em complexas equações de mecânica dos fluidos (equações de Navier-Stokes), solucionadas em todos os pontos de uma malha de alta resolução, em 2D ou 3D, que representa a discretização do volume simulado.

Simulação de iluminação natural e artificial

Simulação computacional para avaliação do desempenho luminoso e energético de sistemas de iluminação em edifícios que envolvem uma combinação de múltiplas variáveis, as quais podem ser alteradas simultaneamente visando compatibilizar bem-estar individual, arquitetura e economia. Com a melhoria da capacidade dos processadores se tornou possível desenvolver modelos realistas com a inclusão da iluminação natural e sombreamentos para simular diferentes cenários e gerar bases de dados para análise de alternativas distintas de eficiência energética quando a edificação está em fase de projeto ou após a construção.

Sistema de gestão de portfólio energético

Abordagem integrada, por meio de simulação e do uso de algoritmos avançados, visando a ampla avaliação e otimização de projetos relacionados à geração distribuída com energia renovável, eficiência energética e cogeração. Permite que tomadores de decisão e profissionais realizem uma pré-análise e verifiquem de forma rápida e simplificada a viabilidade técnica e financeira das oportunidades de combinação entre os projetos, reunidos em uma única plataforma, bem como monitorar as informações em tempo real sobre o desempenho energético das edificações depois de construídas, estabelecendo metas de redução (ou produção) de energia e emitindo relatórios contínuos de redução das emissões de gases do efeito estufa associadas às tecnologias de energia limpa de forma a garantir que os desempenhos dos investimentos se mantenham no longo prazo.

Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta para investigar sistematicamente o desempenho ambiental de produtos, processos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até seu descarte ou reciclagem. Após tal avaliação, é possível identificar oportunidades de melhoria de maneira consciente. A metodologia não é recente, contudo, o desenvolvimento de softwares e bancos de dados vem facilitando seu emprego no segmento de edificações. Existem hoje no mercado diversos softwares específicos que auxiliam nesta avaliação.

Impressão 3D

Trata-se de uma classe de tecnologias de manufatura aditiva, que possibilita a construção de componentes tridimensionais complexos ou mesmo estruturas monolíticas in loco, a partir de modelos virtuais e softwares específicos, com mínimo ou nenhum desperdício, a partir da deposição sequencial de camadas regulares de material. Há diversos tipos de impressoras 3D, que utilizam, cada qual, diferentes tipos de materiais, como plásticos, metais ou argamassas.

Realidade Aumentada

Realidade Aumentada é a sobreposição de objetos virtuais em ambientes reais, de forma que ambos coexistem na perspectiva do usuário. Sua visualização depende de um equipamento eletrônico, como óculos adaptado ou um celular com câmera.

Blockchain

Trata-se de uma plataforma tecnológica de registro distribuído, que visa descentralizar processos e tornar as informações trocadas mais seguras. Funciona como um livro-razão de registros e informações sobre um projeto (ou mercado, ou moeda), altamente criptografado, que visa fazer com que qualquer transação (seja de valores ou informações), se torne um processo direto entre as partes envolvidas, de acordo com os seus papéis e excluindo a necessidade de um intermediário. A informação distribuída é necessariamente consensual e o grau de transparência para os *stakeholders* pode ser controlado, de modo que somente as informações importantes para cada parte sejam acessadas. A plataforma é regida por contratos inteligentes, que são softwares construídos para avaliar automaticamente as regras de negócio de cada transação e registrar seus resultados. Na plataforma *Blockchain*, os contratos inteligentes rodam simultaneamente em várias máquinas (nos nós da rede, de responsabilidade de

múltiplos *stakeholders*) e as transações só são validadas se houver consenso entre os resultados. Transações feitas em *Blockchain* não podem ser desfeitas, o que as torna extremamente confiáveis e auditáveis. Um dos mais proeminentes e transformadores usos da *Blockchain* pode ser percebido no mercado de energia elétrica, mais precisamente nas aplicações concebidas para comunicação e para o armazenamento e envio de dados em redes inteligentes de transmissão e distribuição de energia, na gestão dos contratos de energia, na comercialização de certificados de origem e no despacho inteligente em *redes inteligentes*.

Software de gerenciamento Ágil

O gerenciamento Ágil em edificações é a aplicação neste segmento dos princípios do gerenciamento Ágil desenvolvido inicialmente para desenvolvimento de *Software*. Ele se constitui de um conjunto de práticas destinadas a melhorar a eficácia dos profissionais, equipes e organizações e se baseia no planejamento adaptativo, no desenvolvimento evolutivo, na entrega antecipada e na melhoria contínua, e incentiva respostas flexíveis às mudanças nos requisitos, disponibilidade de recursos e compreensão dos problemas a serem resolvidos. Existem diversas técnicas e diversos produtos comerciais no mercado associados a elas. Entre as técnicas deste gerenciamento utilizadas em edificações, destacam-se: a SCRUM para trabalho em equipe que estimula as equipes a aprenderem com as experiências, a se organizarem enquanto resolvem um problema; o Kanban para comunicação e transparência do trabalho, nesta técnica os itens de trabalho ganham representação visual, permitindo que os membros da equipe vejam o estado de cada parte do trabalho a qualquer momento; e o método Lean, cujo foco é diagnosticar e diminuir todos os desperdícios dentro da empresa ou de algum projeto em específico, nele um dos conceitos é MVPs que seria a versão mais simples e eficiente possível de um produto, servindo como uma espécie de teste para validar aquela ideia. Esta tecnologia pode ser utilizada em conjunto com outras como a BIM.

Sistemas de gestão predial (BMS)

São sistemas inteligentes e autônomos que visam aumentar os níveis de conforto e de segurança de edificações, enquanto simultaneamente reduzem o consumo de energia e os custos de operação.

Sensores, atuadores e interruptores inteligentes

Esta área abrange múltiplas tecnologias, diversos tipos de equipamentos e técnicas e se constitui na base do processo de digitalização no sentido de monitoramento e gerenciamento das variáveis que promovem a eficiência

energética. Os sensores são responsáveis pela medição das grandezas que se desejam gerenciar, controlar ou simplesmente conhecer e podem ser analógicos ou digitais. As medições dos sensores analógicos passam por um processo de digitalização para serem utilizados nas técnicas digitais. Os atuadores, dentro de uma lógica de controle pré-estabelecida, transformam energia geralmente elétrica em mecânica para exercer a função desejada pela automação. O interruptor inteligente é uma evolução que utiliza as informações provenientes do sensor para realizar uma determinada ação, inclui ainda a sofisticação de poder usar tecnologias de comunicação e transmissão de dados para controle através da internet, comando de voz ou outra forma de comando remoto. Além de poder realizar ações de gerenciamento de energia como diminuir a intensidade da iluminação sem desligá-la.

Os sensores tiveram sua popularização impulsionada pela automação industrial na década de 50 e hoje é parte essencial na automação e gerenciamento de edificações. São ativados pela mudança de grandezas físicas do ambiente, instalações ou de sistemas como temperatura, umidade, luminosidade, pressão, movimento de massas, movimentos de fluido ou até estados binários de outras grandezas. Podem ser categorizados em capacitivos, indutivos, fibra óptica, laser, ultrassônico, etc. Os atuadores assim como os sensores foram popularizados pela automação industrial e atuam em edificações, principalmente comerciais, públicas e multifamiliares, no controle/ajuste de fluido, portas, claraboias, etc.

Os interruptores inteligentes são chaves com uma inteligência embarcada que envolve geralmente sensores, transmissão de dados via *wifi*, processamento interno para receber e dar comando e através deles controlar as cargas de edifícios e residências. O barateamento desta tecnologia tem levado a sua rápida popularização e, conseqüentemente, ao aumento da venda de eletrodomésticos e tomadas inteligentes que possibilitam tais automações. Existem diversos tipos de interruptores inteligentes comercialmente e sua capacidade de controle vai de um equipamento até diversos sistemas. O controle através de celulares habilita diversas funções de gerenciamento destas cargas que possibilita ações concretas de eficiência energética mesmo remotamente.

Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI)

Conhecido como Protocolo DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*), trata-se de um sistema de comunicação digital entre dispositivos de controle de iluminação, possibilitando a criação de uma iluminação flexível com aplicações para os mais diversos tipos de ambientes devido ao amplo conjunto de programações possíveis. E por tratar-se de um padrão internacional, fixado pela norma IEC 62386 (protocolo aberto), independe dos fabricantes dos produtos, o que assegura a compatibilidade operacional e a troca de dados entre diferentes equipamentos.

Fachadas Inteligentes e outros sistemas

São elementos instalados na envoltória de edificações que visam aumentar o conforto dos usuários, em especial térmico e lumínico, e/ou a eficiência energética da edificação. Podem ser programados para se ajustar de acordo com as condições climáticas (*Rule Based Control - RBC*) ou apresentarem uma rotina fixa.

Assistentes virtuais

Tem como função auxiliar os usuários a desempenhar tarefas, inclusive além do segmento de edificações. As tecnologias encontradas são acionadas e controladas exclusivamente por voz, permitindo o controle de *Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede* e outros dispositivos inteligentes de menor porte. Destaca-se que para o funcionamento dos Assistentes Virtuais, é necessária compatibilidade entre estes e o equipamento a ser controlado.

Aplicativos e controles inteligentes

São dispositivos para monitoramento do desempenho da edificação em tempo real, fornecendo dados sobre seu desempenho por meio de conexões wireless com dispositivos instalados ao longo dos cômodos, estando então diretamente relacionado com a popularização da IoT. Apesar de aplicativos e controles inteligentes apresentarem funções iguais, suas apresentações são diferentes: uns incluem uma tela grande para visualização dos dados; outros são aplicativos para telefones, tornando o acesso a informações mais acessível no cotidiano dos usuários; e ainda englobam dispositivos que permitem o controle dos sistemas.

Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos

Trata-se da tecnologia das chamadas tomadas inteligentes. Agruparam-se neste item as tomadas para carregamento de veículos elétricos por trazer embarcada inteligência no exercício da sua função. As tomadas comercialmente chamadas *tomadas inteligentes* são adaptadores que são conectados nas tomadas elétricas existentes, possuem tecnologia de wireless embutida que permite que equipamentos ligados às estas tomadas inteligentes possam ser controlados por aplicativo de celulares, tablets ou computadores ou por comandos de voz, sem a necessidade que os equipamentos serem inteligentes. Desta forma, pode-se controlar iluminação, condicionamento de ar, eletrodomésticos, entre outros. São consideradas como a entrada para a automação residencial por serem mais acessíveis financeiramente e de fácil instalação.

Os carregadores de veículos elétricos possuem tecnologia *wireless* embarcada, que permite que as informações de carregamento, como o término do carregamento, autonomia adicionada, energia consumida, horário de início e término de cada recarga sejam transmitidas para aplicativos. Esta tecnologia tende a ter uma rápida penetração nas edificações devido a rápida evolução que os veículos elétricos estão apresentando em termos de autonomia e de redução de custo. Esta rápida penetração e a possibilidade de gerar energia para a rede tem levado as agências reguladoras do mundo inteiro a estudar ou implementar mais flexibilidade ao setor de energia. No Brasil, a regulação atual só permite a direção de fluxo da rede de distribuição para o veículo, chamada de G2V, ou seja, o veículo como consumidor de energia.

Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede

São eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede que têm capacidade de gerar dados sobre seu desempenho ao longo da operação que servem como apoio para tomada de decisão de medidas de eficiência energética. Quando funcionam autonomamente, podem ser operados por aplicativos inteligentes, interruptores inteligentes ou assistentes virtuais. Além disso, em alguns países são utilizados em programas de gestão da demanda.

Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação

A resposta da demanda refere-se aos mecanismos para gerenciar o consumo dos clientes em resposta às condições de oferta, como por exemplo, realizar a redução ou deslocamento do consumo de energia em momentos críticos por meio de pagamentos ou em resposta a preços de mercado, o que requer esquemas específicos de tarifação. A melhor maneira de operacionalizar esse tipo de estratégia é através do uso de medidores inteligentes (*Medidores inteligentes*), bem como de equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede e tomadas inteligentes, que podem proporcionar a automação da flexibilização da demanda com base na variação tarifária, a melhoria de informações e *feedback* (*awareness*) e a interface com programas de eficiência energética.

Computação em Nuvem

Trata-se da entrega de serviços de computação usando uma rede de servidores remotos hospedados na Internet para armazenar, gerenciar e analisar dados. Podem ser oferecidos em 3 diferentes níveis: Infraestrutura como serviço (*infrastructure as a service*, IaaS), que oferece recursos fundamentais de computação, armazenamento e rede sob demanda e pagos conforme o uso; Plataforma como serviço (*platform as a service*, PaaS), que além dos itens de IaaS, fornecem um ambiente sob demanda para desenvolvimento, teste, fornecimento e gerenciamento de aplicativos de *Software*; e *Software* como serviço (*Software as a service*, SaaS), que além dos serviços relacionados a PaaS, oferece a entrega de aplicativos de *Software* pela Internet sob demanda, geralmente, baseada em assinatura. Os itens subsequentes apresentam as matrizes morfológicas por fase do ciclo de vida das edificações, notas sobre cada solução em relação à fase e considerações sobre a aplicabilidade às cinco tipologias elencadas.

2.1.1 FASE DO CICLO DE VIDA: Projeto

A fase de projeto tem a propriedade de impactar todo o ciclo de vida de uma edificação e a característica de possuir a maior flexibilidade em relação a alterações em todo o seu ciclo de vida. Ou seja, realizar uma adaptação na fase de projeto impacta menos no custo do edifício do que na fase de construção e muito menos do que na fase de operação. Isto significa que investir mais na etapa de projeto garante que as fases subsequentes enfrentarão menos percalços, dado que mais problemas são previstos antes de se iniciar a construção e a operação. Ademais, quando a eficiência energética

for adotada como premissa desde a concepção, certamente as edificações terão melhor desempenho energético durante a operação.

Apresenta-se, a seguir, a matriz morfológica das soluções digitais para a fase de projeto. Na sequência, descrevem-se as tecnologias e sua aplicabilidade às tipologias de edificações e domínios abordados neste estudo, explicitando-se as diferentes referências bibliográficas em cada elemento dessa matriz.

Quadro 1 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de projeto. Fonte: Elaboração própria.

Projeto					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Simulação de iluminação natural e artificial [14] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Simulação de iluminação natural e artificial [14] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Simulação de iluminação natural e artificial [14] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Simulação de iluminação natural e artificial [14] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [11; 12; 15-16] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Simulação de iluminação natural e artificial [14] <i>Blockchain</i>
AVAC	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15;16] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [11; 16] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [16] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i>

Quadro 1 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de projeto. (Continuação)

Projeto					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [14-16] Simulação de iluminação natural e artificial [14] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 13] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i>
Equipamentos, cargas de tomada	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] <i>Blockchain</i>
Infraestrutura predial	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 17-19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 17-19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 17-19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 17-19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [17-19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13]
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [20] Sistema de gestão de Portfólio Energético [21;22] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistema de gestão de portfólio energético [21] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Sistemas de gestão de portfólio energético [21;22] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [15] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Sistemas de gestão de portfólio energético [21;22] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [16] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 22] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [16] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i>

Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 17-19]

A tecnologia BIM tem o potencial de influenciar na digitalização e eficiência energética de todos os domínios levantados (tanto aqueles que envolvem projetos específicos, como envoltória, AVAC e Iluminação, como aqueles que são instalados nos edifícios, como equipamentos, medidores, etc.), dado que se propõe a funcionar como um repositório das informações técnicas (e, portanto, das especificações de materiais, sistemas e equipamentos, bem como processos construtivos, unidades de medição, tipo de mão-de-obra associada, recursos necessários para a construção ou instalação, etc.) sobre uma edificação, atreladas a representações gráficas tridimensionais detalhadas de cada um dos seus elementos, independentemente dos subsistemas do qual fazem parte. Complementarmente, os softwares que utilizam a tecnologia são dotados de visões e pacotes de funcionalidades direcionados a diversas especialidades de projetistas e profissionais relacionados à construção civil. Com isso é possível que as atividades de projeto de cada especialidade sejam desempenhadas de forma colaborativa em uma plataforma comum que facilita a sua compatibilização, na medida em que não somente viabiliza a disponibilização de arquivos base entre os profissionais, como pode evidenciar (tridimensionalmente e em visualizações técnicas como plantas, cortes, elevações e detalhes) as interferências entre os projetos específicos, resultando em um documento digital “vivo”, mais preciso, com menor possibilidade de falhas e obtido com menos retrabalho, o que em projetos convencionais, estruturados em silos com conhecimentos e tecnologias específicos e dotados de baixa interoperabilidade não seria possível. Não obstante, permite a evolução gradual do detalhamento, de acordo com a maturidade do projeto, possibilitando a sua evolução a partir de simulações de desempenho (estrutural, termoenergética, etc.) e a extração gradual de dados consolidados que retroalimentam as decisões de projeto, visando ao atendimento tanto de premissas específicas como de parâmetros legais, normativos e atrelados a certificações. Importante frisar que, a tecnologia pode ser aplicada a quaisquer tipologias de edificações, mas é mais viável para aquelas com maior complexidade/porte. Ainda, para o bom funcionamento do trabalho colaborativo faz-se geralmente largo uso de armazenamento em nuvem, no que se denomina *Common Data Environment* – CDE (ambiente comum de dados), que permite que as informações sobre o projeto possam ser acessadas por todas as equipes.

As informações associadas aos elementos possibilitam a economia de tempo e redução de erros e aumento da precisão em processos de orçamentação, dado que as quantificações são obtidas automaticamente com base no modelo virtual e podem ser associadas a bases de dados

referenciais de preços unitários (de materiais, mão-de-obra, equipamentos, etc.) e outros indicadores externos. A dimensão de temporalidade pode também ser incluída no modelo, facilitando a elaboração de cronogramas e o planejamento das etapas da construção, prevenindo interferências e restrições relacionadas a maquinário e outros equipamentos necessários para a obra e facilitando o balanceamento de recursos.

Projetos melhores e dotados de mais camadas de planejamento e informação tendem a propiciar um menor índice de erros, desperdícios e retrabalho, possibilitando a entrega de um edifício de melhor qualidade com um custo mais baixo.

Menos erros, menos retrabalho, automação do processamento das informações, maior previsibilidade do funcionamento e *feedback* contínuo para a melhoria da qualidade do projeto, bem como a possibilidade de atuar como hub de informações centralizadas oriundas de outros sistemas e tecnologias, permitem não só a economia de recursos durante a fase de projeto como também subsidia a eficiência energética durante todo o ciclo de vida da Edificação, desde que o modelo seja mantido atualizado.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A tecnologia BIM na fase de projeto já está em um estágio bastante maduro e tende a ter uma relação de importância e aplicabilidade diretamente proporcional à complexidade do projeto, por oferecer melhoria significativa e facilitação na compatibilização de projetos elaborados por diferentes profissionais, bem como facilitar a orçamentação e organizar as informações. Dessa maneira, se aplica mais diretamente a edificações de maior porte, sejam comerciais e de serviços, públicas, residenciais multifamiliares, e ainda habitações de interesse social, quando multifamiliares ou modulares encaradas em conjunto. No caso de edificações unifamiliares, exceto as de alto padrão, em geral os projetos são feitos por um único profissional, de modo que a percepção de ganho relativa à colaboração e compatibilização tende a ser reduzida, bem como a orçamentação, dado que a quantidade de itens a dimensionar é consideravelmente menor. A percepção de benefícios é também reduzida para edificações de menor porte das demais tipologias.

Modelagem Energética da Edificação (BEM) [23; 24; 25]

A tecnologia BEM tem capacidade de atuação em grande parte dos domínios por estar relacionada à energia elétrica e térmica. São os casos de sistemas de AVAC, iluminação, aquecimento de água, cargas de tomadas e equipamentos, bem como itens de infraestrutura predial consumidores de energia, que podem ser avaliados em conjunto ou individualmente. Sendo assim, é possível o diagnóstico do domínio com maior consumo energético, e consequentemente com maior potencial de melhoria, e a criação de alternativas para alcançar uma menor demanda de eletricidade. Importante notar que as simulações levam em consideração as informações sobre o clima local, como temperaturas, umidade do ar, insolação, etc. Em edificações de maior porte, uma oportunidade de utilização do BEM é estimar o aquecimento de água pelo sistema de AVAC e explorar sua reutilização na própria edificação ou mitigar o aquecimento indesejado de ambientes adjacentes às casas de máquinas. Outro domínio em que o BEM se aplica é a envoltória, onde a ferramenta pode ser utilizada para estudos do impacto de diferentes materiais ou até mesmo orientações da edificação no consumo de energia elétrica da edificação ou no conforto térmico dos usuários.

A Modelagem Energética da Edificação tem sido frequentemente utilizada em conjunto com o *Machine Learning (Aprendizagem de máquina)* de forma a dar os resultados ótimos para as simulações que este consegue realizar. Tal combinação tem sido consideravelmente benéfica para o desempenho das edificações, principalmente em cenários em que se deve atingir um determinado *benchmark* de desempenho, como em edifícios europeus NZEB – *Net Zero Energy Buildings*.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A tecnologia de simulação termoenergética de edificações aplicada à fase de projeto auxilia a concepção de envoltórias com o potencial de prover maior conforto térmico e lumínico aos usuários e, ao mesmo tempo, menos dependentes de sistemas consumidores de energia. Ajuda ainda a otimizar os sistemas energéticos, buscando, por exemplo, aproveitar cargas térmicas residuais. Contudo, há ainda no Brasil uma grande carência de profissionais capacitados e atuantes na área, o que eleva o custo das simulações e as restringe a entusiastas ou àqueles com demandas explícitas relacionadas a certificações de sustentabilidade ou eficiência energética. O custo tende a se diluir para empreendimentos de maior porte ou alto padrão, principalmente aqueles para os quais há replicabilidade (como pavimentos tipo e/ou unidades modulares), nesse contexto são diretamente aplicáveis a Edificações Comerciais e de Serviços, cujo interesse se reflete no melhor custo operacional fixo, o que tende a reduzir taxas de vacância e aumentar o valor comercial, bem como a residenciais multifamiliares, cujo modelo tende, no Brasil, a ser mais simples, por não terem sistemas centrais de condicionamento de ar. Para edificações multifamiliares, entretanto, há a dificuldade adicional de os usuários terem pouca conscientização em relação à eficiência energética, de modo que não é uma prioridade para boa parte do mercado consumidor. Edificações públicas teriam o enorme potencial de se valer do uso desta tecnologia, visto que a redução dos custos fixos de infraestrutura e operação é sempre bem quista para a sociedade, liberando recursos para usos mais nobres. De forma similar, Habitações de interesse social, por serem em geral altamente replicadas e, em alguns casos, verticalizadas, por motivo similar poderiam valer-se da tecnologia, de modo a reduzir custos de operação, dado que em geral tendem a ser tarifas subsidiadas. A viabilidade se reduz bastante quando o objeto é uma edificação unifamiliar ou comercial/serviços de pequeno porte, dado que o custo não é diluído, de modo que só se viabiliza em empreendimentos de alto padrão ou aqueles que são objeto de estudos acadêmicos.

Fluidodinâmica Computacional (CFD) [26-38]

O CFD se torna parte integrante da concepção de projetos devido à sua capacidade de prever o efeito da ventilação natural nos edifícios antes que estes sejam construídos e, em especial, para a redução do consumo de energia dos equipamentos de ar condicionado, analisando as diversas estratégias projetuais até que se obtenha um resultado satisfatório e otimizado.

É utilizado principalmente nos estudos de conforto térmico, dispersão de poluentes e aerodinâmica de estruturas, permitindo criar condições de contorno bem próximas da realidade e reduzir o tempo de processamento se comparado aos protótipos físicos. Os túneis de vento e outras formas de testes físicos geralmente usam fatores de correção empíricos. Em contraste, o CFD pode simular o fluxo de ar usando um modelo digital de tamanho completo, sem limitações de escala, produzindo todos os resultados quantitativos e qualitativos que se esperaria de testes físicos (por exemplo, arrasto e perda de pressão), além de fornecer uma visão mais aprofundada dentro do volume do fluido para visualização em 3D.

A metodologia CFD possui três etapas: pré-processamento (definição dos parâmetros e confecção do modelo computacional), simulação (resolução das equações) e pós-processamento (extração dos dados relevantes, gráficos e tabelas).

Para o setor de AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado) existem módulos específicos nos softwares CFD que auxiliam simular a difusão de substâncias fluidas em ambientes controlados (como salas de cirurgias e salas limpas), avaliar o condicionamento de salas especiais (como *datacenters*) e o aquecimento dentro de equipamentos específicos (microeletrônica, motores), dentre outros. Isso permite obter um sistema AVAC mais eficiente, com a interação combinada entre os equipamentos mecânicos, o edifício e os fluxos de ar.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A tecnologia de simulação CFD tem um mercado ainda mais restrito que o da simulação termoenergética, no Brasil, no que diz respeito ao uso para avaliar o potencial de conforto térmico devido a trocas de calor, principalmente por convecção, em substituição ou complemento a sistemas de condicionamento de ar. Segue a mesma lógica anteriormente apresentada para BEM, dado que o mercado é incipiente e há carência de mão-de-obra específica, além de baixo valor percebido pelo usuário padrão. Sua aplicabilidade é maior para o projeto de sistemas complexos de condicionamento híbrido ou para localidades específicas em que o regime de ventos apresenta grande potencial (como o Estado de Alagoas, por exemplo). No entanto, como no caso de BEM, os benefícios oriundos de um projeto bem concebido em termos de soluções passivas de ventilação natural serão auferidos durante toda a vida útil da edificação, o que também pode ser muito favorável para edificações públicas e de habitação de interesse social.

Simulação de iluminação natural e artificial [39-56]

Através da simulação computacional é possível desenvolver projetos de iluminação com uma qualidade superior, desde cálculos complexos até renderizações de apresentação, e dimensionar com mais rapidez e precisão os diversos tipos de sistemas para as mais variadas necessidades de usos e atividades desenvolvidas nos ambientes, mas em especial para a obtenção de níveis elevados de eficiência energética e conforto lumínico.

Os programas e softwares de cálculo luminotécnico são notadamente importantes para a previsão e o correto aproveitamento da luz natural (ao longo do dia e do ano), possibilitando uma melhor compreensão do fenômeno ao permitir a modelagem do desempenho físico dos raios de luz e seus efeitos de acordo com as propriedades espectrais dos materiais para qualquer complexidade geométrica. Estudos revisados na literatura mostram que a disponibilidade e as variações de luz diurna (temporais e espaciais) sob diferentes condições externas à edificação (vista do céu, claro ou nublado) têm impactos significativos na iluminação dos ambientes e para a melhoria da produtividade dos usuários, desde que adequadamente projetados e utilizados.

Uma das variáveis fundamentais a ser considerada nas alternativas simuladas, visando à redução do consumo de energia, é a interação do sistema de iluminação com outros equipamentos e sistemas, como o condicionamento de ar e os dispositivos de sombreamento de fachadas.

Outro fator considerado na fase de projeto e que as simulações têm auxiliado é a integração dos sistemas (iluminação artificial e natural) e o gerenciamento eficiente da iluminação e seus acionamentos, bem como o controle dos níveis de iluminância baseados nos perfis de uso e ocupação. Esses requerem o processamento de dados específicos, permitindo o alcance de otimizações energéticas significativas, por isso se tornaram uma estratégia-chave em termos de redução de energia e de emissão de calor residual proveniente da iluminação.

Dentre as mais de 200 ferramentas de simulação listadas atualmente no *Building Energy Simulation Tools Web Directory* (BEST-D), página da internet mantida pela *International Building Performance Simulation Association* (IBPSA-USA), encontram-se diversos programas para o desenvolvimento de projetos luminotécnicos. A partir dos resultados gráficos e relatórios numéricos gerados pelos programas é possível estimar a energia a ser consumida especificamente pela iluminação, seu custo e o impacto ambiental provocado pelas alternativas de projeto antes mesmo da sua execução.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

As simulações de iluminação natural e artificial são ferramentas úteis para projetos de luminotécnica adequados em edificações de diferentes usos e portes. Por meio da utilização de softwares próprios para tal função, é possível garantir os níveis adequados de iluminação para os usuários (lux) de acordo com as suas atividades, inclusive considerando a luz natural. Incrementa-se então não só o conforto lumínico como também a eficiência energética da edificação, visto que é possível reduzir a utilização das lâmpadas e priorizar a iluminação natural. Alguns softwares inclusive permitem o seccionamento dos sistemas de iluminação, como, por exemplo, em lâmpadas próximas das janelas e mais distantes. Desta forma, é possível que nem todas as lâmpadas estejam ligadas ao mesmo tempo, contribuindo também para a redução do consumo de energia. No Brasil, a maioria dos softwares utilizados são internacionais, porém por usarem dados climáticos locais geram dados com acurácia e permitem sua implementação em território nacional. Contudo, uma barreira é a falta de disponibilidade de profissionais com domínio das ferramentas, seja pela falta de conhecimento pleno da sua utilização ou pela necessidade de conhecimento multidisciplinar em arquitetura e elétrica.

Sua maior aplicação é em projetos de grande porte ou relacionados à etiquetagem/certificações, principalmente, em edifícios comerciais e de serviços, além de pesquisas acadêmicas. A replicabilidade é um elemento chave para a popularização da simulação de iluminação artificial em mais empreendimentos (pavimentos tipo e/ou unidades modulares). Contudo, tal fator não é aplicável para a simulação de iluminação natural, visto que esta é influenciada diretamente por fatores locais como latitude, entorno, sombreamento e etc.. Em grandes projetos tal custo tem baixo impacto no orçamento final, mas geralmente não é financeiramente viável para residências unifamiliares salvo as de alto padrão. Projetos de habitação de interesse social replicados na mesma região e com a mesma orientação podem auferir benefícios com o uso desta tecnologia, visto que o bom aproveitamento da iluminação natural tende a reduzir o consumo de eletricidade durante toda a operação.

Sistemas de Gestão de Portfólio Energético [21; 22; 57-60]

Os softwares e plataformas de análise de projetos contém módulos específicos para análises financeiras, cálculos de fluxos de caixa, análise de sensibilidade e de risco, e podem comportar todos os tipos de tecnologias para geração e uso de energia, tanto as fontes tradicionais e não-tradicionais de energia limpa como as fontes de energia e tecnologias convencionais, auxiliando na melhor compreensão e comparação das soluções e para determinar a viabilidade técnica e financeira das propostas ainda nas primeiras fases de desenvolvimento dos projetos.

As amostras de modelos disponíveis para simulação podem incluir: eficiência energética (desde grandes instalações industriais a residências unifamiliares), aquecimento e refrigeração (ex. biomassa, bombas de calor, aquecimento solar do ar/água), energia (incluindo as renováveis como a solar, eólica, das ondas, hidroelétrica, geotérmica, etc., mas também as convencionais como as turbinas a gás/vapor e os motores alternativos), e a combinação de energia e calor (ou cogeração), dentre outros arranjos.

A maioria das ferramentas também apresenta módulos específicos para análise de diversos tipos de projetos e podem ser aplicadas a todas as tipologias e tamanhos de edifícios. Também usadas para suporte no desenvolvimento de cálculos para edifícios NZEB.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Com a gradual redução dos custos de implementação dos sistemas de geração solar fotovoltaicos, a regulamentação do setor e o frequente aumento das contas de eletricidade, motivados pela irregularidade dos níveis dos reservatórios e o despacho adicional de térmicas nos últimos anos, a adoção da geração distribuída vem crescendo no País. Outros insumos, como o gás natural e o gás liquefeito de petróleo também vem sofrendo altas sucessivas, de modo que também vem aumentando a busca por coletores solares para aquecimento de água. Ferramentas do gênero são a melhor maneira de dimensionar adequadamente esses e outros sistemas que utilizam energias renováveis. São mais utilizados para edificações menos verticalizadas, isto é, aquelas cuja área de cobertura é relativamente grande em relação ao número de unidades, o que recai sobre edificações comerciais como *shopping centers*, grandes varejistas, supermercados, edificações públicas, comerciais e de serviços não verticalizadas, edificações unifamiliares e habitações de interesse social.

Esses softwares também auxiliam no dimensionamento de sistemas de cogeração qualificada, geotermia, aproveitamento de energia térmica residual de diferentes processos e sistemas de AVAC, aplicando-se nesses casos fundamentalmente a grandes edifícios comerciais, bem como a edifícios públicos verticalizados.

Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13; 61; 62]

A avaliação de ciclo de vida tem ênfase nos materiais a serem utilizados em determinada edificação, tendo então o potencial de utilização em todos os domínios da edificação. Contudo, percebe-se uma maior influência na envoltória, principalmente em edificações residenciais, sendo empregada para definição de materiais das vedações da construção. Em edificações não residenciais, percebe-se uma maior investigação dos domínios de iluminação, infraestrutura predial e AVAC. Apesar de muitas das vezes se abordar elementos que consomem energia elétrica - como lâmpadas - destaca-se que a perspectiva da ACV é do seu impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. Um dos maiores desafios para a avaliação de ciclo de vida é a utilização de softwares internacionais. Desta forma, os bancos de dados destes programas podem não necessariamente representar a realidade local onde a análise está sendo realizada, devido às diferenças nos processos ao longo de todo o ciclo de vida. É necessário então enfatizar a importância da utilização de dados atualizados, segundo uma abordagem espaço-temporal e tecnológica.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Devido à sua aplicação de análise dos impactos ambientais dos materiais ao longo de todo o seu ciclo de vida, a avaliação de ciclo de Vida tem potencial de utilização em todas as tipologias do segmento. Contudo, destaca-se que seu alto custo atual para realização limita suas aplicações a projetos de maior porte, como comercial e de serviços, e também projetos residenciais de elevado padrão. Apesar de serem grandes emissores de gases efeito estufa, também representam uma fração pequena do mercado de construção do Brasil, sendo ideal para alcançar as metas climáticas nacionais a sua difusão em maior escala. A sua replicabilidade é complexa, visto que muitos elementos de uma ACV são relativos ao local da construção, envolvendo até mesmo a distância do local de produção dos materiais até o canteiro. Sendo assim, mesmo em projetos de baixo custo, porém modulares e que são construídos em diversas localidades, é inviável a realização de apenas uma avaliação de ciclo de vida. Ações que poderiam contribuir para a redução do tempo da realização de uma ACV - e conseqüentemente seu custo - seria a elaboração de um banco de dados nacional. Atualmente, o levantamento de dados para uma avaliação de ciclo de vida é realizado com base em bancos de dados internacionais e informações levantadas pela própria equipe, o que é trabalhoso. Tal ação também auxiliaria na precisão das avaliações realizadas.

Realidade Aumentada [17; 63]

Por meio da utilização desta tecnologia, é possível a criação de protótipos e/ou maquetes virtuais para melhor visualização do projeto por parte da equipe responsável pela sua concepção. Sendo assim, não só é possível uma melhor compreensão das experiências e sensações transmitidas para o usuário, como também a visualização da montagem de elementos complexos e conferência da sua exequibilidade. É a única fase do ciclo de vida do edifício em que se prioriza a utilização de celulares com câmera/tabletes ao invés de óculos adaptados para visualização, em especial pelo menor custo e maior praticidade.

Blockchain [64]

Na etapa de projeto, diversas aplicações podem auxiliar o segmento, como aquelas referentes à obtenção de fundos para a viabilização de empreendimentos, sem a necessidade de intermediários, mas a maior contribuição para a eficiência energética oriunda da tecnologia *Blockchain* refere-se ao seu uso relacionado às certificações. Nesse caso, é possível agregar uma camada de *Blockchain* às certificações de eficiência energética potencial (como as Etiquetas do PBE Edifica e o Selo Procel Edificações), proporcionando: maior agilidade na concessão, dado que as verificações de atributos poderiam se dar a partir de contratos inteligentes, reduzindo os tempos de espera; proporcionando aumento da confiança, posto que processos automatizados e reconhecidos entre o *stakeholders* a cada transação reduzem a chance de falha humana e de desentendimentos entre as partes; aumento da fluidez da informação e transparência controlada, permitindo a cada parte interessada acessar somente os dados que lhe dizem respeito; total auditabilidade, uma vez que transações não podem ser desfeitas e, por fim, a possibilidade de agregação de valor tangível à eficiência por meio da emissão, atrelada às certificações, de *tokens* fungíveis (lastreados em ativos, cuja espécie, quantidade, qualidade e valor são comparáveis) de eficiência energética potencial. Há no Brasil uma iniciativa pioneira constante no terceiro Plano de Aplicação de Recursos do Procel, denominada Projeto *Smart Selo Procel* – Aplicações em plataforma *Blockchain* para Certificação de Eficiência Energética, que tenciona agregar uma camada de *Blockchain* ao Selo Procel e pode vir a ser disponibilizada para Edificações. Assim sendo, aplica-se a todas as tipologias de edificações em seus subsistemas considerados na avaliação para o Selo (portanto envoltória, AVAC, iluminação e aquecimento de água), bem como para equipamentos atendidos pelo Selo.

Considerações sobre a aplicabilidade de realidade aumentada a diferentes tipologias do segmento

A utilização de Realidade Aumentada em diferentes tipologias depende diretamente de um modelo digital da edificação a ser construída para permitir a sua visualização. Visto que atualmente a maioria dos empreendimentos utiliza alguma plataforma deste tipo, desde as mais complexas como o BIM até as mais simples apenas para renderização, tal fator não é uma barreira para sua implementação e permite sua aplicação em todas as tipologias do segmento de edificações. Contudo, percebe-se um maior interesse de utilização nas tipologias residenciais, podendo atualmente já ser até mesmo visto em *stands* de vendas de alguns empreendimentos multifamiliares. A dominação desta tipologia se dá pela tradição de visitas a "apartamentos decorados" antes da compra de unidades, o que pode ser substituído pela Realidade Aumentada a um custo consideravelmente menor para as construtoras. Residências Unifamiliares também tomam proveito de tal tecnologia, porém em uma menor escala e visando explorar os laços afetivos com o local antes da construção e realizar modificações no projeto. Essa tecnologia não é utilizada em projetos de habitações de interesse social já que não há interação entre clientes e construtoras durante o projeto.

Considerações sobre a aplicabilidade de Blockchain a diferentes tipologias do segmento

A tecnologia *Blockchain*, uma vez incorporada ao Selo Procel, deve influenciar as edificações Comerciais, de Serviços e Públicas nos domínios envoltória, AVAC e iluminação, bem como equipamentos e cargas de tomada, além de infraestrutura predial (como bombas) e sistemas de geração solar fotovoltaica. Já para as tipologias residenciais, em todo o seu espectro, devem influenciar a envoltória, o aquecimento de água e, pelo lado dos equipamentos, as cargas de tomada, condicionamento de ar e iluminação e sistemas de geração solar fotovoltaica.

Softwares de gerenciamento Ágil

Nesta fase das edificações, nos programas computacionais baseados em frameworks ágeis, como SCRUM, Kanban e Prince2 se tornam ferramentas importantes que dão suporte a construção do gêmeo digital da edificação, que provê uma estrutura detalhada, mas de interação amigável para gerenciar projetos complexos que reúnem muita informação. A necessidade de uma visualização 3D realística, tanto externa quanto interna tem se demonstrado primordial.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares de gerenciamento Ágil a diferentes tipologias do segmento

As tecnologias associadas ao Gerenciamento Ágil podem ser escalonadas para serem utilizadas em projetos de todas as tipologias, no entanto tendem a ser mais utilizadas em projetos maiores que normalmente se concentram no residencial multifamiliar, comercial, público. A padronização dos projetos de habitação social não tem motivado uso de ferramentas mais robustas de projeto que permitiriam uma mudança rápida do projeto em atendimento às demandas do cliente.

Computação em Nuvem

Na fase de projeto, o armazenamento em nuvem é tecnologia habilitadora para o compartilhamento e edição colaborativa de arquivos, como o que ocorre no Ambiente de Dados Comum - *Common Data Environment* (CDE) relacionado à tecnologia BIM. A capacidade de processamento em nuvem permite reduzir o tempo de simulação, possibilitando testar mais soluções em tempo reduzido, com vistas a obter maior eficiência. Além disso, evita a compra e manutenção de *hardware*, e minimiza a necessidade de equipes locais de infraestrutura de TI.

Considerações sobre a aplicabilidade da computação em nuvem a diferentes tipologias do segmento

A utilização de computação em nuvem tem se tornado mais acessível, principalmente com a popularização de servidores, plataformas e softwares que permitem o oferecimento do serviço no varejo. Apesar disso, seus benefícios são mais aproveitados em projetos que demandam múltiplos usuários trabalhando ao mesmo tempo ou em que há necessidade de envio de documentos para projetos complementares (ar-condicionado, luminotécnica, etc.), ou ainda aqueles com alta complexidade e que demandam elevada capacidade de processamento para efetuar análises específicas (como resultados de simulações complexas) ou gerar produtos finais (como renderizações). Quando apenas uma pessoa é responsável pelo projeto, a utilização de computação em nuvem perde parte da função de plataforma colaborativa, funcionando como backup e permitindo compartilhar informações com o cliente e, eventualmente, alguns prestadores de serviço terceirizados. Sendo assim, geralmente sua utilização se dá em projetos de residências multifamiliares, comerciais, públicas ou de serviços, devido ao seu porte e complexidade de execução.

2.1.2 FASE DO CICLO DE VIDA: Construção

Na fase de construção reside a responsabilidade de concretizar os projetos com a maior fidelidade possível, preservando a qualidade e as propriedades especificadas. É muito comum que, dada a alta reatividade a mudanças pelo setor da construção civil no Brasil e à baixa maturidade e especialização da mão-de-obra em geral, o produto final difira bastante daquele projetado, o que pode impactar consideravelmente os desempenhos simulados durante toda a fase de operação. Ademais, embora considerando todo o ciclo de vida dos edifícios o impacto em termos absolutos no consumo de recursos não seja alto como o da fase da operação, em termos relativos, considerando o prazo comparativamente curto, trata-se do maior impacto

concentrado. Isto posto é importante pensar em como a digitalização pode tornar o edifício construído mais fiel ao projeto (ou melhor), bem como em auxiliar na redução do consumo de recursos e emissões durante a fase de construção.

Apresenta-se, a seguir, a matriz morfológica das soluções digitais para a fase de construção. Na sequência, descrevem-se as tecnologias e sua aplicabilidade às tipologias de edificações e domínios abordados neste estudo. As mesmas tecnologias podem ser utilizadas em diferentes tipologias e são aqui repetidas porque as referências bibliográficas que embasaram o estudo são diferentes.

Quadro 2 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de construção. Fonte: Elaboração própria.

Construção					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [12;17; 65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [12;65] Realidade Aumentada [12; 66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Impressão 3D [12;17; 65] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [12; 17; 65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [12; 17; 65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i>
AVAC	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i>
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i>

Quadro 2 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de construção. (Continuação)

Construção					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Aquecimento de água	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i>
Equipamentos, cargas de tomada	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i>
Infraestrutura predial	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 19] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;18] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;18; 9] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;18; 9] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i>
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Sistemas de Gestão de Portfólio Energético Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i>

Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 18; 19]

Nesta fase do ciclo de vida da edificação o modelo BIM desempenha o papel de orientação para a construção, tanto pelo conjunto de desenhos e informações técnicas, como pela facilitação do gerenciamento e da logística pelo planejamento, temporalidade e ordenamento das etapas da construção, permitindo a visualização e edição de cada uma de suas “camadas” a seu tempo, bem como as condições de contorno necessárias à sua execução e parâmetros de aceite. Os custos associados a estas etapas permitem também o acompanhamento dos desembolsos e do valor que eles proporcionam, bem como a comparação com o previsto, permitindo maior controle e possibilidades de mitigação.

Por outro lado, o modelo BIM demanda o incremento constante do detalhamento e a atualização de parâmetros de forma compatível à maneira que cada elemento foi de fato construído, instalado ou implementado. Aqui são inseridas por exemplo informações de status da execução, datas de aquisição e instalação e prazos de garantia de equipamentos e elementos, alterações de geometria, materiais, etc., em relação ao projeto executivo, tempos de execução e alocação de recursos para cada elemento, etapa ou sistema componente da edificação, de modo que, ao término da fase de construção tem-se o projeto *as-built*, que facilitará sobremaneira a operação, na medida em que o registro representa precisamente o que está construído, e contém informações adicionais sobre garantias, validades, fornecedores, instruções de uso e manutenção dos materiais e equipamentos, prazos estimados para manutenção preventiva, agenda e regras de automações e setup de horários de funcionamento de cada componente, etc.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Na fase de construção, a tecnologia BIM tem um grande potencial de uso no segmento de edificações e no Brasil, já há políticas específicas para o estímulo à sua adoção. A exemplo da União Europeia (Diretiva 2014/24/UE), o Brasil está estabelecendo um marco legal para a adoção do BIM, no âmbito da Estratégia BIM BR, instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019 e no Decreto nº 10.306 de 02 de abril de 2020, que estabelece a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, ampliando gradualmente a adoção em fases definidas até 2028. A reserva de mercado que se constrói a partir de uma iniciativa estruturada como essa aumenta a disponibilidade de profissionais habilitados no mercado, que permeiam a sua atuação para outras tipologias, inicialmente as mais complexas, como edificações comerciais e de serviços, passando pelas residenciais multifamiliares e conjuntos de habitações de interesse social, até que se popularizem definitivamente e sejam adotadas para edificações unifamiliares em geral, o que é essencial para a demanda de atualização do projeto que a fase de construção engloba. Nesta fase, a orçamentação dinâmica e a ordenação das etapas da obra tendem a elevar a qualidade e previsibilidade de entrega no segmento e facilitam a gestão do almoxarifado, das compras e do controle do andamento da obra, questões que podem ser percebidas como benefício em qualquer tipologia.

Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61; 62; 67]

A avaliação do ciclo de vida é uma ferramenta importante para redução dos impactos ambientais do canteiro de obras. Sua utilização permite quantificar os impactos causados pela produção, transporte e uso dos equipamentos utilizados, assim como o consumo de energia e de água, ao longo de toda a operação [67]. A ACV tem potencial de identificar oportunidades de materiais que inicialmente seriam descartados e que possivelmente podem ser reutilizados no próprio projeto. Contudo, caso a solução seja de fato o descarte, também é do seu escopo a escolha de um local adequado para sua destinação levando em consideração o fim da vida (reuso, reciclagem ou outros) e o impacto ambiental do seu transporte.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares para ACV a diferentes tipologias do segmento

Muito embora o escopo da avaliação de ciclo de vida seja aplicável a qualquer tipologia de edificação, na prática, é utilizada fundamentalmente por edificações comerciais e de serviços, residenciais multifamiliares e unifamiliares de alto padrão, destinadas a mercados interessados em gestão ambiental e sustentabilidade. Observa-se que se esta ferramenta fosse utilizada nos instrumentos de política pública das habitações de interesse social talvez viabilizasse a adoção de soluções de eficiência energética, seja passiva ou digital, nas condições de financiamento na medida em que os investimentos iniciais adicionais poderiam ser justificados pela redução do custo operacional ao longo do tempo.

Realidade Aumentada [12; 17; 66; 73]

A utilização da Realidade Aumentada durante a construção está relacionada à sobreposição do modelo virtual da planta-baixa (ou de outros desenhos técnicos) como projetado no ambiente real. Sendo assim, é possível a conferência do que foi construído e orientação a montagem de elementos complexos. Não só contribui para a velocidade dos processos, mas também para a segurança dos funcionários e reduz as chances de erros.

Destaca-se que a Realidade Aumentada apenas permite a visualização de um modelo virtual em um ambiente real, ou seja, caso não haja compatibilidade entre os domínios (exemplo: sobreposição entre a iluminação e a tubulação de água), não há nenhuma solução que a tecnologia possa trazer no próprio canteiro. Sendo assim, para um maior proveito do potencial da Realidade Aumentada recomenda-se sua utilização em conjunto com um modelo virtual com maior precisão e mais informações, tal qual como a Modelagem da Informação da Construção (*BIM*).

A realidade aumentada pode contribuir para a capacitação dos funcionários em atividades produtivas, reduzindo a necessidade de estudo preliminar e substituindo manuais e instruções de montagem impressas, que nem sempre são suficientemente claros, principalmente quando relacionados a montagens complexas, como sistemas mecânicos e sistemas elétricos, na medida em que reconhece elementos e instrui passo a passo o uso de ferramentas, conexões e processos, com informações visíveis e encadeadas até a consecução dos objetivos.

Considerações sobre a aplicabilidade de realidade aumentada a diferentes tipologias do segmento

Pela necessidade de visualização de múltiplos desenhos técnicos no canteiro por meio da Realidade Aumentada, sua aplicabilidade é maior em projetos de grande porte ou que utilizem a plataforma BIM. Sendo assim, se vê uma maior entrada em edificações comerciais e de serviços, públicas, residenciais multifamiliares, e ainda habitações de interesse social (quando estas são multifamiliares ou modulares). No caso de residências unifamiliares, apesar da Realidade Aumentada ser útil na etapa de projeto, devido à complexidade consideravelmente menor do canteiro e da execução, tende a ser uma tecnologia não difundida em tal tipologia salvo em residências de altíssimo padrão.

Impressão 3D [12; 17; 65; 68-72]

No que diz respeito à construção civil, aplica-se fundamentalmente à envoltória, mas o limiar da tecnologia permite que seja usada para a impressão de peças complexas de equipamentos mecânicos, desde que haja modelo tridimensional vetorizado, impressora de material compatível e *Software* adequado, o que possibilita a construção de mecanismos específicos (bem como a sua manutenção a partir de peças de reposição). No que tange à envoltória, há fundamentalmente dois tipos de grandes categorias de impressoras que podem ser aplicáveis: as que fazem grandes impressões monolíticas *in loco*, em geral usando argamassas cimentícias (mas que podem ser adaptadas para usar outros tipos de argamassas com menor pegada de carbono), estruturais ou não; e as que imprimem (*in loco* ou à distância) peças/componentes a título de pré-fabricação ou criação de moldes para reprodução de itens pré-fabricados modulares. Por se tratar de manufatura aditiva, possibilita a construção de geometrias altamente complexas, algumas das quais sequer seriam possíveis por outros métodos, com mínimo ou nenhum desperdício, na medida em que deposita, de forma controlada, sucessivas camadas de material até chegar à forma final modelada tridimensionalmente, em lugar de processar um bloco pré-existente de material base. Os benefícios se iniciam no uso reduzido de material e na baixíssima geração de resíduos sólidos, passam pela velocidade e pela possibilidade de liberdade formal precisa e sem falhas de execução e culmina nos ganhos logísticos, dado que se utiliza menos mão-de-obra, para os casos de impressão de componentes gera peças leves de fácil manuseio e montagem, que dispensam o uso de maquinário pesado e consumidor de energias fósseis e reduzem o impacto com transporte.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

As máquinas de Impressão 3D de argamassas (cimentícias ou não) são usadas para impressão de estruturas e fechamentos monolíticas *in loco* tem como diferencial a possibilidade de gerar formas complexas em relativamente pouco tempo para unidades de pequeno porte, gerando estruturas e fechamentos opacos completos em cerca de um dia, entretanto possuem ainda um custo elevado por conta da estrutura necessária para construir eixos coordenados tridimensionais de tamanho superior às unidades que se deseja construir. Tem alta aplicabilidade para condomínios ou habitações de interesse social, em que há grande reprodutibilidade das unidades, diluindo o custo de implementação e reduzindo o tempo final de entrega. Impressoras de menor porte geram peças individuais, de modo que o processo tem que ser repetido continuamente até completar o número desejado de elementos, entretanto, por ser um processo automatizado e silencioso, pode ser realizado sem interrupções. Outra estratégia para este tipo de máquina é a de imprimir moldes para utilização no canteiro, permitindo a obtenção de formas complexas com relativo baixo custo pela sua replicabilidade. Desta forma, é possível sua aplicação em projetos modulares com menor orçamento, como, por exemplo, edificações multifamiliares, públicas e até mesmo habitação de interesse social a depender da durabilidade do molde. Devido às limitações de porte e orçamento, as residências unifamiliares tendem a não explorar a utilização de impressoras 3D, salvo em estudos acadêmicos que visam explorar sua potencialidade em cenários futuros, desconsiderando seu custo e com um olhar voltado para as possibilidades técnicas.

Blockchain

No que diz respeito à fase de construção, a tecnologia de *Blockchain* tem um grande potencial de facilitar as transações comerciais e transações de imóveis, desde a aquisição do terreno, passando pelo parcelamento, até a emissão do Registro Geral de Imóveis (RGI) de cada unidade comercializada. Além disso, pode auxiliar enormemente na logística de controle de estoque e almoxarifado, principalmente se associado ao uso de Identificadores de radiofrequência (RFID), permitindo o acompanhamento do percurso dos materiais e o seu posicionamento na construção, o que coíbe corrupção e desvios, bem como possibilita acompanhar a integridade da obra. Pode ainda ser associado à tecnologia BIM e a redes de sensores para auxílio na comparação dos quantitativos de materiais utilizados com as previsões de projeto, ou ainda na comparação gráfica entre imagens em tempo real do canteiro de obras e os estágios de evolução previstos/reportados no modelo BIM, atrelando faturamentos a marcos de execução regidos pelos contratos inteligentes. Atrelado a materiais de construção, o *Blockchain* passa a ser uma ferramenta importante de acompanhamento do ciclo de vida da edificação, podendo abastecer inventários e Softwares de Avaliação do Ciclo de Vida. Voltando à seara dos contratos inteligentes, o *Blockchain* pode auxiliar na gestão de terceiros ao adotar parâmetros automáticos para permitir faturamentos.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Com as tecnologias de *Blockchain* já existentes, é possível um controle de toda a entrada e saída de materiais de construção do canteiro de forma a reduzir perdas e desvios de materiais. Todavia, há que se avaliar o custo-benefício da adoção da infraestrutura de hardware e *Software* requeridas, de modo que a implementação é mais viável em edificações de maior porte comerciais, de serviços e públicas, bem como residenciais multifamiliares e de habitação social, cuja construção é em geral regida por grandes empreiteiras. Atualmente, a aplicação a edificações residenciais unifamiliares oferece menor percepção de benefícios, salvo para certificações ambientais onde o canteiro de obras é parte da pontuação, então todo o processo deve ser acompanhado e validado. Nestes casos, independente do porte ou da tipologia, a utilização de *Blockchain* é uma excelente alternativa pela segurança dos contratos e pela auditabilidade.

Softwares de gerenciamento Ágil [74-79]

Nesta fase, a utilização dos programas computacionais do método Ágil tem se mostrado eficaz no controle no andamento dos projetos. Um projeto de construção geralmente envolve longas etapas e diferentes equipes em cada uma delas. Problemas de alinhamento entre os profissionais envolvidos, falta de clareza nos prazos e obstáculos na transparência do processo ao cliente podem comprometer seriamente a qualidade na execução de uma obra. A metodologia Ágil nesta fase facilita a prevenção e controle de irregularidades nos orçamentos e prazos, a integração de pessoas com o projeto, revisões e adaptações nos cronogramas, propiciando encurtamento de ciclos e permitindo agilidade nos processos e melhoria da gestão das atividades.

Assim, as metodologias ágeis nos propõem novas formas de executar projetos, contornando esses problemas tão comuns. Ele induz a colocação do cliente no centro em todas as decisões a serem tomadas. O propósito não é apenas construir algo para o cliente, mas sim junto com o cliente, participando-o o máximo no processo. Com isso conseguimos identificar erros muito mais facilmente nos processos, além de permitirem mais flexibilidade para adaptar o que for necessário durante a execução.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares de gerenciamento Ágil a diferentes tipologias do segmento

O uso desta tecnologia deve se disseminar fortemente nas construtoras que atuam no setor comercial pelas vantagens que alcançam notadamente em grandes e complexas implementações de projeto onde a logística é central. Aspectos de redução de riscos, redução de custos, atendimento ou encurtamento de prazo, personalização do projeto e aumento de produtividade das equipes têm sido comumente relatados. Assim sendo aplicam-se prioritariamente àquelas construções realizadas por construtoras ou grandes empreiteiras independentemente da tipologia.

Computação em Nuvem

Durante a construção, os serviços em nuvem permanecem essenciais por proporcionarem comunicação facilitada tanto entre o escritório e o canteiro, como também com fornecedores, prestadores de serviços terceirizados e com os clientes. A importância relativa do tema tende a ser crescente na medida em que os serviços associados à nuvem se tornam mais variados e abrangentes e o canteiro se digitaliza. Arquivos digitais podem evitar o uso de papel, os custos de impressão, facilitar a obtenção de arquivos atualizados reduzindo a possibilidade de falhas e retrabalho.

Considerações sobre a aplicabilidade da computação em nuvem a diferentes tipologias do segmento

A utilização de Computação em Nuvem é aplicável em todas as tipologias, considerando que os projetistas não necessariamente ficam o tempo todo na obra, permitindo uma comunicação mais fluida entre escritório e canteiro. Também possibilita o fornecimento de desenhos técnicos novos e informações atualizadas em tempo real, caso haja alguma modificação necessária. A Computação em Nuvem também é vista como uma tecnologia de suporte e funciona como facilitadora de outras apresentadas anteriormente, como a Realidade Aumentada. Torna-se então um elemento-chave em projetos de maior complexidade, necessitando não só da sua existência, mas também de uma infraestrutura de internet confiável e rápida.

Sensores, atuadores e interruptores inteligentes [74; 80]

Um dos desafios apontados na literatura é a diminuição do consumo de recursos durante a fase da construção. O gerenciamento de energia nesta fase demanda a utilização de sensores de consumo de energia, combustível e água. Os dados gerados por estes sensores poderiam ser utilizados para a gestão e a educação dos trabalhadores da obra. Gráficos com o consumo diário e ações de incentivo à economia destes insumos, através de metas ou competições entre equipes, poderiam ser elaboradas. A inclusão do tema da conscientização ambiental nos treinamentos, de segurança do trabalho, normas da empresa e instruções de trabalho, poderia surtir efeitos positivos aproveitando os dados reais fornecidos pelos sensores. A aplicação de interruptores inteligentes poderia fazer com este gerenciamento pudesse em parte ser feito remotamente tanto pelos responsáveis pela construção como pelos trabalhadores.

Os sensores e interruptores inteligentes poderiam quantificar desperdícios comuns encontrados em canteiros de obra no Brasil como a utilização de equipamentos sem manutenção e uso inadequado levando ao maior consumo, não levar em consideração a eficiência dos equipamentos, máquinas e eletrodomésticos para as instalações provisórias das obras, uso de lâmpadas de baixa eficiência nas áreas de vivências das obras, emprego de torneiras e de bacias sanitárias de baixa qualidade e auxílio à captação de água da chuva para reaproveitamento em obra.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Esta tecnologia poderia ser aplicada para todas as tipologias, no entanto as construções de residenciais unifamiliares geralmente não têm sofisticação suficiente para que este tipo de acompanhamento proporcione impactos positivos. No que tange a outras tipologias, a aplicação cresce de importância na mesma proporção do tamanho do canteiro de obra. Interessante notar que embora a economia de energia se transforme em lucro para as construtoras com a redução das despesas, esta ação tem recebido pouca atenção no Brasil. Nas construções de habitações de Interesse Social, esta tecnologia só se viabiliza para grandes projetos.

2.1.3 FASE DO CICLO DE VIDA: Operação

Durante a fase de operação observa-se a maior fatia de consumo de recursos e emissões em todo o ciclo de vida das edificações. É importante perceber que nesta fase grandes alterações implicam em custos altos, de modo que as condições de contorno para o que deve ser gerido estão estabelecidas e melhorias específicas precisam aguardar a viabilização de custos de oportunidade. Vale ressaltar os benefícios da digitalização ao automatizar atividades repetitivas ou reativas a fatores em constantes mudanças, de modo a evitar excessiva alocação de pessoal (que implica em custos) e falhas humanas; ao acompanhar e analisar informações para verificar a conformidade

do funcionamento, prever a necessidade de manutenção e melhorar o desempenho; ao gerenciar automaticamente transações e despachos de ativos energéticos entre as unidades que a compõem e instâncias externas, dentre outros benefícios.

Apresenta-se, a seguir, a matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação. Na sequência, descrevem-se as tecnologias e sua aplicabilidade às tipologias de edificações e domínios abordados neste estudo.

Quadro 3 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação. Fonte: Elaboração própria.

Operação					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81] Sensores e atuadores [82] Fachadas Inteligentes e outros sistemas [83; 84] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81] Sensores e atuadores Fachadas Inteligentes e outros sistemas [81;84] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sensores e atuadores Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Fachadas Inteligentes e outros sistemas [83] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) Sensores e atuadores [82] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Fachadas Inteligentes e outros sistemas [83; 84] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Impressão 3D [65] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sensores e atuadores [82] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Fachadas Inteligentes e outros sistemas [83]

Quadro 3 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação. (Continuação).

Operação					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
AVAC	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 85] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de Gestão de Portfólio Energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 85; 87; 89- 91; 93; 94] Sensores e atuadores [82; 84; 85; 87; 90; 93; 94] Assistentes virtuais Controles inteligentes/ Visores inteligentes/aplicativos inteligentes [90] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de Gestão de Portfólio Energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 87- 90; 91; 93-95] Sensores e atuadores [84; 87; 90; 93 -95] Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [90] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 85] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sensores e atuadores Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [90] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 87; 91] Sensores e atuadores [87] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 85] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2;13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 87; 90; 91; 93; 94] Sensores e atuadores [82; 84; 87- 90; 93; 94] Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [84; 90; 93] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 85] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada Blockchain Sensores e atuadores [82; 84; 87; 90; 93; 94] Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes tomadas inteligentes Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] Sistemas de gestão predial (BMS)[81; 84; 87; 90; 91; 94]
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [14; 39; 96] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [14; 39; 84; 90; 91; 93; 94] Sensores e atuadores [14; 39; 82; 85; 90; 93; 94; 97] Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI) [14] Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [39; 84; 90; 93] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [39; 84; 90; 91; 94; 95; 93] Sensores e atuadores [39; 90; 94; 95; 93] Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI) Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [39; 84; 90; 93] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sensores e atuadores Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] Sistemas de gestão predial (BMS) [91] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [39; 84; 90; 91; 93; 94] Sensores e atuadores [82; 90; 94; 93; 97] Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI) Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [39; 84; 90; 93] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Blockchain Sensores e atuadores [39; 82; 93; 94] Assistentes virtuais Aplicativos e controles inteligentes [39; 93] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86; 92] Sistemas de gestão predial (BMS) [39; 91; 93; 94]

Quadro 3 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação. (Continuação)

Operação					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Aquecimento de água	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 94; 98] Sensores e atuadores [82; 94] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 94] Sensores e atuadores [94] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 98] Sensores e atuadores 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 94; 98] Sensores e atuadores [82; 94] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] <i>Blockchain</i> Sensores e atuadores [82; 94] Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 90; 94; 98]
Equipamentos, cargas de tomada	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [16; 5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 94] Sensores e atuadores [94; 82] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [84; 94] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [96; 99; 100] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 93-95] Sensores e atuadores [93-95] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [84; 94] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [97] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [84] Sensores e atuadores [84] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [97; 99; 100] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] <i>Blockchain</i> Sistemas de gestão predial (BMS) [83; 93] Sensores e atuadores [81; 83; 93] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [93] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [85] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [93; 98; 99] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12; 16] <i>Blockchain</i> Sensores e atuadores [82; 94] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [94] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [18; 86] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [18; 84; 97; 99; 100] Computação em Nuvem

Quadro 3 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de operação. (Continuação)

Operação					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Infraestrutura predial	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 12;18; 19] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético [94] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 91; 94] Sensores e atuadores [82; 93; 94] Computação em nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de Gestão de Portfólio Energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 84; 91; 93; 94] Sensores e atuadores [93; 94] Computação em nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10;12] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 91; 102] Sensores e atuadores [98; 102] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [102] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 19] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 91; 94; 102] Sensores e atuadores [82; 94; 98; 102] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [94] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede [96; 99] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [102] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 19] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sensores e atuadores [82; 94; 98; 101; 102] Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [94] Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [102] Sistemas de gestão predial (BMS) [81; 91; 94; 102]
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 81; 84; 94] Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Blockchain Sensores e atuadores [82] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [81] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 81; 84; 94] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sensores e atuadores [94] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [81] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 81; 98; 104; 105] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sensores e atuadores Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 81; 94; 98; 104; 105] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Blockchain Sensores e atuadores [82; 94] Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [94] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13] Realidade Aumentada [66] Blockchain Assistentes virtuais Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [94] Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [86] Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 81; 84; 94; 98; 104; 105] Computação em Nuvem

Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 18; 19; 85]

O projeto *as-built*, no modelo BIM e suas bases de dados associadas trazem consigo todo o repositório de informações pertinentes da edificação e permite ao gestor ou a um serviço de gestão (que pode inclusive atender a edificações residenciais unifamiliares ou a conjuntos de edificações) o acesso, ajuste e alerta ao(s) proprietários sobre as melhores práticas de uso, periodicidade de manutenção, etc. Para que se mantenha útil é importante que o gestor mantenha as informações atualizadas, atribuindo ao modelo o histórico de alterações por que o edifício passa com o tempo, pequenas reformas, substituições de equipamentos, valores de consumo de recursos, etc.

A associação das informações oriundas do projeto *as-built*, construído no modelo BIM, e dados oriundos de sensores diversos (com diferentes funções) distribuídos pela edificação permite a constituição de um Gêmeo Digital (*Digital Twin*) do edifício. As informações do mundo físico oriundas dos sensores e associadas aos objetos virtualizados do modelo podem ser submetidas a análise via aprendizagem de máquina (*machine learning*), de modo a adaptar e automatizar preferências dos usuários ou reagir a restrições impostas (como critérios de conforto ambiental e eficiência energética), ajustar critérios operativos visando à otimização, antever problemas e testar possibilidades em ambiente virtual (sem necessidade de aquisição de materiais, testes reais, riscos, etc.), habilitar critérios de manutenção preditiva, etc.

Modelagem Energética da Edificação (BEM) [23; 96; 103]

A utilização do BEM na etapa de operação depende da obtenção em tempo real de dados sobre a edificação, como ocupação dos cômodos, e de variáveis climáticas, como temperatura. Tais dados são cruciais para a realização de múltiplas simulações associadas à Aprendizagem de Máquina de forma a detectar relações e até mesmo dar diretrizes aos usuários. Sendo assim, a edificação pode realizar simulações em tempo real considerando as condições e avaliar opções que podem melhorar o desempenho energético da edificação. Alguns exemplos são recomendar desligar as luzes ou o ar-condicionado de áreas ociosas. Em alguns casos, as edificações conseguem gerar uma autonomia em até mesmo prever o comportamento dos usuários no curto prazo. Por meio dos sensores, seria possível identificar se é um dia útil ou não e criar um perfil energético mais adequado, ou até mesmo considerar se realmente é benéfico para o desempenho térmico da edificação desligar o AVAC durante o almoço.

Considerações sobre a aplicabilidade de BIM a diferentes tipologias do segmento

Com relação ao projeto *as-built*, seu relativo baixo custo o torna aplicável a todas as tipologias: residenciais multifamiliares, unifamiliares, habitação de interesse social, comerciais e de serviços e públicas. Por permitirem ao usuário ter diretrizes sobre posicionamento tridimensional de instalações e/ou elementos estruturais, podem ser especialmente úteis nas tipologias residenciais onde a manutenção e pequenas obras fiscalizadas pelos próprios usuários são mais frequentes. Já a aplicação do Gêmeo Digital (*Digital Twin*) se limita a edifícios de maior complexidade e automação, sendo geralmente empregado nas tipologias comerciais e de serviços.

Considerações sobre a aplicabilidade de BEM e a diferentes tipologias do segmento

A utilização do BEM necessita de dados em tempo real da edificação, ou seja, de pelo menos um sistema de sensores que o alimente para a realização das simulações de forma a gerar as alternativas. Sendo assim, devido à complexidade não só do estabelecimento da tecnologia em si, mas também de toda a rede dos sensores e de uma conexão sem fio para que estes cheguem até o computador onde as simulações serão realizadas, a utilização do BEM na operação é limitada a edificações comerciais e de serviços. Apesar da tecnologia BEM poder responder às demandas das tipologias de Habitação de Interesse Social, Pública e Unifamiliares, com a disponibilidade atual no mercado nacional não há penetração sustentada destas no segmento, salvo em empreendimentos unifamiliares de altíssimo padrão.

Sistemas de Gestão de Portfólio Energético [20;21; 57-60; 81; 84; 85; 93; 94; 98; 100; 104-105-106]

O gerenciamento integrado entre os consumos energéticos e a geração de energia proveniente de diversas fontes, com ou sem armazenamento de energia (baterias), pode ser realizado de forma automática, equilibrada e flexível por meio de ferramentas computacionais que auxiliam no arranjo das soluções de forma otimizada e econômica. Um sistema híbrido com uma inteligência incorporada também permite a priorização do fornecimento por fontes renováveis (autoprodução) sobre o fornecimento da rede de forma a cumprir metas em sustentabilidade e a economizar custos com energia.

Os softwares e programas de gerenciamento de portfólio energético permitem que os responsáveis pela operação da edificação verifiquem em tempo real (por hora ou sub-hora, intervalos com conexão direta com bancos de dados, como SQL) o desempenho energético de suas instalações, integrem dados de alta resolução, emitam constantemente diversos tipos de relatórios e gráficos (como séries de tempo semanais e diárias, curva de duração da carga e gráficos de mapa de calor), façam cálculos de balanço energético do edifício, bem como previsões e comparações frequentes do consumo real (ou produção) com as metas estabelecidas. Na fase de operação e manutenção predial por vezes também se faz necessário a comparação das instalações com outras semelhantes (análise de benchmark), o que tem sido auxiliado pelas novas tecnologias digitais.

Considerações sobre a aplicabilidade de sistemas de gestão de portfólio energético a diferentes tipologias do segmento

Na fase de operação ainda há a necessidade de mudança de paradigma quanto ao reconhecimento da necessidade de profissionais competentes para operar os edifícios com foco no desempenho energético. Esta questão impacta bastante o uso deste tipo de ferramenta, como uma solução, dado que não se trata de uma tecnologia autônoma, mas sim de suporte à decisão. Atualmente seu uso é mais frequente em edificações comerciais e de serviços geridas por empresas de facilities comprometidas com o tema e edificações públicas com Comissões Internas de Conservação de Energia (CICE) constituídas e atuantes. A aplicabilidade, entretanto, se estende às demais tipologias de edificações e, dada a variação recente dos custos de energia e a entrada em operação de sistemas de geração distribuída, uma fatia de mercado pode ser criada para a terceirização da gestão desses ativos, incrementando o uso desta classe de ferramentas digitais.

Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13; 61; 62]

Os benefícios da Avaliação do Ciclo de vida ao longo da operação de edificação estão relacionados à redução dos seus impactos ambientais por meio da utilização de fontes renováveis para geração de energia limpa *in-loco*. Apesar da microgeração energética por meio de fontes como fotovoltaica e eólica em si não ter impacto ambiental, é necessário também considerar o transporte, processo de fabricação e descarte dos mesmos de forma a escolher a opção mais adequada.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares para ACV a diferentes tipologias do segmento

Apesar da utilização de fontes renováveis para geração de energia estar consolidadas em todas as tipologias, a realização de uma Avaliação de Ciclo de Vida associada a tal implementação é rara. Geralmente ocorre em grandes projetos comerciais e de serviços que visam uma certificação NZEB. Contudo, com a popularização do mercado de créditos de carbono (e até mesmo com a proposta de créditos pela redução de consumo de energia) acredita-se que a adoção da ACV na etapa de operação de todas as tipologias será consolidada.

Impressão 3D [65]

Para os casos de envoltórias complexas e construídas a partir de componentes impressos (sejam eles unitários ou modulares), não é difícil prever a disponibilidade de uma impressora que funcione durante a operação do edifício para prover peças de substituição, principalmente aquelas submetidas a maiores esforços ou que compõem sistemas dinâmicos (com maior desgaste). Nesse caso se mantém o ganho logístico descrito para a etapa de construção. Dado que as impressoras utilizam metais ou plásticos termorrígidos, o material oriundo das peças avariadas é reciclável, inclusive localmente, seja por um equipamento adicional ou pela própria impressora.

Considerações sobre a aplicabilidade de impressão 3D a diferentes tipologias do segmento

A aplicabilidade da Impressão 3D na operação, considerando um cenário no qual o maquinário já foi adquirido para a realização da obra, é viável em qualquer uma das tipologias. Há uma evolução considerável na evolução da Impressão 3D de materiais plásticos termorrígidos, sendo possível hoje imprimir pequenas peças com um custo relativamente baixo. Sendo assim, a viabilidade está relacionada ao porte da peça a ser impressa (e, portanto, à capacidade da impressora). Impressoras 3D de metais são consideravelmente mais caras e podem ser viáveis somente para grandes empreendimentos de qualquer tipologia, como um serviço compartilhado entre um grande número de unidades ou por uma grande instituição pública ou privada.

Realidade Aumentada [17; 66; 73]

A Realidade Aumentada, quando utilizada durante a operação, é uma ferramenta chave para uma maior eficiência e segurança na manutenção e vistoria da infraestrutura e sistemas de iluminação, AVAC e aquecimento de água das edificações.

Considerações sobre a aplicabilidade de realidade aumentada a diferentes tipologias do segmento

Para a manutenção da infraestrutura predial, a Realidade Aumentada é uma ferramenta que pode ser utilizada em qualquer tipologia, desde que os desenhos técnicos necessários estejam disponíveis para sua visualização e compatíveis com o que está construído. Sendo assim, há uma maior aplicação nos setores comercial, de serviços, públicos, de habitação de interesse social e habitação multifamiliar, onde a utilização da plataforma BIM permite a extração de múltiplos desenhos técnicos com precisão.

Blockchain [100]

Na fase de operação o *Blockchain* pode ajudar a controlar ativos (eletricidade, água, gás, calor, frio, etc.) consumidos e gerados, controlando despachos automaticamente através de contratos inteligentes. Este controle e despacho pode se dar entre as unidades do edifício ou em transações consolidadas entre o edifício e as distribuidoras ou outros edifícios. A questão das certificações faz sentido novamente nesta etapa, com destaque para as certificações de origem de energias renováveis, adquiridas por edifícios que pretendem alcançar balanço de energia neutro, mas não possuem fontes de geração distribuída suficientes para tal. Embora não seja ainda uma prática estabelecida, existe também a possibilidade de *tokenizar* a eficiência energética na operação, a partir da comparação do consumo efetivo do edifício com um benchmark calibrado com parâmetros da edificação. A rigor, é possível digitalizar (via *tokens*) todos os ativos comercializáveis do setor elétrico, respeitando suas características e parâmetros por fungibilidades distintas, o que permitiria a conformação de um ecossistema de *trade* específico, principalmente com o atual cenário de aumento da comercialização de energia no mercado livre, com serviços associados e remunerações via *tokens*. Práticas como estas possibilitam a criação de mecanismos de fomento à eficiência energética com altíssimo grau de confiabilidade e valor agregado reconhecido pelo mercado.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A rigor, a tecnologia de *Blockchain* pode ser aplicada a qualquer tipologia de edificação na etapa de operação, desde que tenham instalados medidores inteligentes relacionados a cada ativo consumido ou produzido e relações estabelecidas formalmente entre *stakeholders* (mediadas por contratos inteligentes). Todavia, considerando que ainda se trata de um mercado em evolução, é mais facilmente aplicado entre unidades que compartilham o mesmo conjunto de infraestrutura, como edificações multifamiliares, públicas e comerciais e de serviços, fundamentalmente aquelas com capital aberto e requerimentos de sustentabilidade para listagem em bolsa, que se utilizam de certificações de origem para comprovar o uso de energia limpa.

Sistemas de Gestão Predial (BMS) [15; 39; 81; 84; 85; 87; 88; 90; 91; 93; 94; 98; 102; 107]

Em conjunto com os sensores e atuadores, é um sistema eficiente para reduzir o consumo energético nos domínios de AVAC e de iluminação, mantendo o conforto dos usuários. Tal sistema tem autonomia para tomar medidas específicas em resposta à demanda em horários de pico do consumo de energia, sendo vantajoso principalmente em cenários com tarifa dinâmica. São exemplos de ações tomadas a geração de perfis de consumo com base na ocupação do cômodo, desligamento dos equipamentos depois de desocupação após determinado tempo e, no caso da iluminação, ligar/desligar de acordo com as condições externas. Também pode gerir a geração de energia *in- loco* de maneira integrada com a sua demanda, maximizando a microgeração nos horários com maior demanda da própria geração ou do entorno para maximizar o retorno econômico. Contudo, destaca-se que os *Building Management Systems* não se limitam a equipamentos elétricos, podendo também gerir, por exemplo, o aquecimento e fornecimento de água, além de prever a necessidade de manutenção de equipamentos e estruturas com base nos perfis de uso.

Visto que atua com base em uma quantidade considerável de dados, uma questão dos BMS é a sua segurança. Por meio da utilização de *Blockchain*, tem o potencial de armazenar em nuvem de forma dispersa, porém criptografada os dados obtidos da edificação de uma maneira segura.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A exemplo do BEM, que também necessita de uma rede de sensores para alimentação dos dados, os BMS têm uma maior aplicabilidade em edificações comerciais, de serviços e públicas. Em edificações residenciais multifamiliares e habitação de interesse social as unidades são autônomas, dificultando a utilização de BMS. Por fim, é um sistema muito custoso para a implementação em residências unifamiliares, porém tem alguma penetração naquelas de alto padrão.

Sensores, atuadores e interruptores inteligentes

Nesta fase, o uso de sensores e atuadores é intensivo. Nos edifícios inteligentes, os interruptores inteligentes se tornam gradativamente mais comuns. A maior parte da energia das edificações é consumida nesta fase, a utilização destas tecnologias possibilita que uma drástica redução de consumo dos insumos energéticos seja alcançada. A utilização de forma inteligente e sustentável destas tecnologias varia de acordo com a tipologia, nível econômico dos usuários do espaço e da sua conscientização.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Em edificações comerciais recém-construídas é comum encontrar sensores de presença, controle automático do sistema de bombeamento, climatização, sensores de controle de água em torneiras e mictórios, dimerização e controle de iluminação, entre outros. Estas tecnologias constituem alguns dos sistemas de automação predial que permitem maximizar a eficiência dos equipamentos, baseando-se no monitoramento contínuo com dados online e possibilitando a tomada de decisão *on time* e a interligação de vários dispositivos. A maioria destes elementos também pode ser encontrada em grandes edifícios públicos, devido a eventuais campanhas de combate ao desperdício. Em relação às habitações de interesse social, a digitalização ainda caminha de forma lenta devido ao poder aquisitivo. Elas entram de forma gradativa na medida em que um determinado produto se barateia com a massificação da produção. As tipologias de residências unifamiliares e multifamiliares têm uma grande variedade de padrão econômico e de conscientização em relação à eficiência energética e seu impacto no meio ambiente, estas questões norteiam o nível de penetração destas tecnologias nestas tipologias. É uma tendência o aumento da penetração dos interruptores inteligentes comerciais que tornam a automação residencial mais prática de ser instalada e mais acessível financeiramente.

Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI) [14; 108-114]

A automação com DALI funciona como uma interface onde a informação flui de um controlador eletrônico até os equipamentos de iluminação ou outros dispositivos controladores, que executam comandos ou respondem a pedidos de informação, permitindo que esses sejam codificados ou recodificados individualmente e/ou atribuídos a grupos via *Software* (sem a necessidade de cabeamento). Precisamente no que diz respeito aos sistemas de iluminação LED, o DALI fica especialmente interessante quando há combinações de luzes com cores variáveis, além do que o controle é digital e integrado diretamente nas lâmpadas, sem a necessidade de ligações complexas compatíveis com fontes de alimentação LED.

O fluxo de informações DALI é bidirecional, por isso além de comandar a iluminação visando configurar e sincronizar diferentes cenários, seja pela regulação de cores e fluxos luminosos, para combinar com a entrada de luz natural ou para criar adaptações de ocupação e desligamento programado (horário, presença etc.), dentre outras programações, também é possível obter informações sobre o estado de manutenção em que se encontra cada equipamento. Isto é feito por meio do retorno de mensagens individuais de cada componente (lâmpada queimada, por exemplo).

De fácil instalação, a Interface de iluminação digital endereçável (*Digital Addressable Light Interface* - DALI), integrada a sensores de movimento ou de luminosidade e a sistemas de Sistemas de gestão predial (BMS) possibilita inúmeras soluções de eficiência energética com custo acessível, além de ajustáveis às mudanças de *layout*.

A DALI Alliance é a organização global da indústria para o Protocolo DALI, responsável pela manutenção de programas de teste e licenciamento, bem como pelas certificações DALI-2 e D4i. O objetivo é aumentar a confiança na interoperabilidade dos produtos e habilitar o DALI para luminárias inteligentes e prontas para a Internet das Coisas (IoT). Buscando padronizar os protocolos de controle de iluminação, muitos fabricantes aderiram ao grupo e apenas os produtos certificados podem ter o logotipo DALI.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A aplicação do DALI se dá em edifícios comerciais, de serviços e públicos, onde seus benefícios podem ser explorados ao longo do dia a dia da edificação. Em caso de Habitações de Interesse Social e Residências Multifamiliares, a instalação é possível em áreas comuns, porém em geral não se viabiliza, dada a baixa utilização, o que faz com que um sistema mais simples, apenas com a utilização de sensores, apresente um melhor custo-benefício.

Fachadas Inteligentes e outros sistemas [15; 81; 83]

Apesar de fachadas inteligentes serem instaladas na envoltória, sua influência é extrapolada para outros domínios da edificação. Por meio do projeto de sistemas de sombreamento dinâmicos, por exemplo, é possível otimizar a geração de energia fotovoltaica em horários de pico como resposta à demanda. Quando realizado um projeto integrado entre elementos de sombreamento dinâmicos e gestão predial, é possível configurar uma fachada inteligente de forma a maximizar o armazenamento de energia térmica por meio da água, posteriormente sendo utilizado em outras áreas da edificação. Contudo, destaca-se que a aplicação principal de sistemas de sombreamento dinâmicos é melhorar as condições internas de luz e temperatura, reduzindo a demanda por sistemas artificiais para iluminação e AVAC.

Uma outra vertente de fachadas inteligentes é o controle automático de aberturas. Tal controle necessita de sensores para identificação do estado da janela e de um motor/atuador para abrir ou fechar a mesma. Seus benefícios estão relacionados à uma edificação de funcionamento híbrido mais eficiente: quando com o AVAC ligado, permite que não haja aberturas indesejadas ou acidentais; porém quando as condições climáticas são favoráveis, permite que a edificação funcione com a utilização apenas da ventilação natural.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Fachadas inteligentes possuem um alto custo associado à manutenção, em especial pelas suas partes móveis. Sendo assim, são encontradas predominantemente em edificações comerciais e de serviços, onde seu custo é justificado pelo horário de operação da edificação. Residências, sejam elas unifamiliares, multifamiliares ou habitação de interesse social, tendem a estar desocupadas durante o dia (salvo finais de semanas e feriados) que são os períodos em que as fachadas inteligentes apresentam a maior parte dos benefícios, não justificando então seu investimento. Edificações públicas, apesar de terem o perfil de ocupação semelhante às edificações comerciais e de serviços e conseqüentemente serem aptas a ter sistemas dinâmicos nas fachadas, tendem a utilizar fachadas estáticas – como, por exemplo, *brises soleil* - para reduzir os custos de manutenção. Sendo assim, não se caracterizam como fachadas inteligentes. Com a redução dos custos de manutenção ou o aumento da durabilidade das peças, porém, acredita-se que a penetração em edificações residenciais e públicas seria facilitada, o que contribuiria consideravelmente para a sua eficiência energética e conforto ambiental.

Assistentes virtuais [115]

A utilização de Assistentes Virtuais tem como diferencial na eficiência energética de edificações a facilidade no controle de equipamentos de pequeno porte, como lâmpadas, até eletrônicos e eletrodomésticos. Alguns dos fatores que contribuem para a sua popularização, além da sua praticidade, é a redução de barreiras de aprendizado de utilização, por meio do controle pela voz e não com plataformas e/ou aplicativos. Alternativas de atuação das *Assistentes virtuais* têm crescido recentemente, porém têm se concentrado no controle da iluminação de ambientes, de *Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede*, sistemas de segurança e controle do termostato/AVAC. Um dos seus diferenciais sob a perspectiva da eficiência energética é a criação de rotinas, como, por exemplo, para ligar e desligar aparelhos, mudar a temperatura, etc.

Considerações sobre a aplicabilidade de assistentes virtuais a diferentes tipologias do segmento

A penetração de Assistentes Virtuais cresceu consideravelmente no setor residencial no último ano, porém enfatiza que a sua utilização tem sido voltada para a unidade autônoma. Controles de iluminação e de sistemas de entretenimento são algumas das aplicações, porém o setor carece de aplicações que tirem proveito da aplicação em larga escala e controlem a edificação como um todo, quase como uma Gestão Predial/Controle de sistemas. Em edificações públicas, comerciais e de serviços de pequeno porte, bem como em áreas comuns de edificações multifamiliares não é comum haver integração de Assistentes Virtuais com automação predial, sendo geralmente utilizados como plataforma os aplicativos e controles inteligentes, eventualmente incrementados pela gamificação.

Aplicativos e controles inteligentes

Tais equipamentos podem ter funções mais gerais na operação de uma edificação, como, por exemplo, equipamentos de entretenimento, rotina para molhar as plantas e configuração de robôs aspiradores. No entanto, com os controles inteligentes, também tem a capacidade de solução de problemas mais robustos e específicos. No caso da iluminação, são capazes de ligar e desligar as luzes de acordo com a sua utilização ou com as condições do ambiente de forma a economizar energia. Também podem controlar o sombreamento externo, como, por exemplo, com a utilização de cortinas inteligentes, visando otimizar o conforto visual e a eficiência energética simultaneamente. Já nos sistemas de HVAC, por meio de termostatos inteligentes é possível o controle pelos usuários das condições internas da edificação, desligando ou ligando remotamente e gerando rotinas para situações ociosas. Para a segurança da edificação, contribui para o monitoramento em tempo real de movimentos suspeitos na edificação mesmo quando desocupada. É possível configurar sensores para a gestão da infraestrutura predial, de forma a detectar automaticamente vazamentos de água, gás e outros.

Considerações sobre a aplicabilidade de aplicativos e controles inteligentes a diferentes tipologias do segmento

Por *displays* e aplicativos terem uma interface mais intuitiva para o público em geral, conseguem ter aplicabilidade em todas as tipologias, sendo menos usados naquelas em que há grandes sistemas centralizados, como edificações públicas, comerciais e de serviços de maior porte. Já os controles inteligentes, como tendem a apresentar relatórios mais completos e/ou necessitam de algum conhecimento do domínio da plataforma para sua utilização, sua implementação tende a se concentrar em edificações comerciais, de serviços e públicas.

Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [81; 84; 94]

Nesta fase do ciclo de vida é que estas tecnologias são utilizadas e podem ser um agente importante de eficiência energética. As tomadas inteligentes possibilitam um gerenciamento de energia de forma a reduzir o consumo de energia e a demanda em determinados horários, podendo ter impacto relevante nos custos operacionais das edificações. A forma e intensidade do uso destas tecnologias estão associadas à forma operacional da edificação e da capacidade financeira do usuário de adquirir, instalar e manter estas tecnologias. A Agência Internacional de Energia apresentou em seu relatório de 2021 que no final de 2020, 10 milhões de carros elétricos transitavam no mundo, após uma década de rápido crescimento. Os veículos elétricos tiveram participação de 4,6% nas vendas de carros, com cerca de 3 milhões de unidades vendidas globalmente. Ônibus e caminhões elétricos também tiveram expansão nos principais mercados, alcançando estoques globais de 600 mil e 31 mil, respectivamente. Esta crescente venda impactará as edificações das tipologias comercial, pública e residencial em um nicho de maior poder aquisitivo.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Neste trabalho, considerou que para as habitações de interesse social no Brasil, os custos dos produtos com esta tecnologia inviabilizariam sua utilização. Ressalta-se que as tomadas inteligentes estão com uma crescente redução de preço e pode ser uma opção futura se para implementar ações de eficiência energética, o custo de eletrodoméstico não inteligente mais a tomada inteligente for menor que o custo de eletrodomésticos inteligentes. Na tipologia residencial tanto unifamiliar como multifamiliar, estima-se que de uma forma geral a utilização das tomadas inteligentes aumente de forma proporcional ao padrão econômico de seus habitantes. No setor comercial e público, espera-se uma utilização mais intensiva e depende unicamente dos gestores. Estas tecnologias podem servir como uma entrada de baixo custo e modularizada para a automação comercial de edificações existentes destas tipologias. Em novas edificações, espera-se que a inteligência da operação seja prevista no projeto, dispensando estes adaptadores. As tomadas de carregamento de veículos elétricos podem conter diferentes tecnologias de carregamento devido à ausência de padronização destes transportes, podendo ser AC ou DC dependendo do veículo, caso o veículo se alimente com DC, este carregador necessita de um retificador para transformar a energia elétrica proveniente das distribuidoras de AC para DC, embora a tecnologia DC apresenta vantagem para carregamento rápido.

Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede

A utilização de *Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede* tem um impacto significativo na redução da demanda energética das cargas de tomadas, devendo-se priorizar a utilização de equipamentos inteligentes naqueles com maior consumo de energia (a depender do uso da edificação). Tais aparelhos variam consideravelmente de porte e de aplicação, porém tendem a se concentrar no setor residencial. Exemplos de Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede são robôs aspiradores, geladeiras inteligentes, aquecedores de água, filtros de ar, e lavadoras de roupa.

Outros sistemas, porém, são de maior porte e têm aplicação mais ampla no segmento de edificação. É o caso do AVAC e refrigeradores, por meio da instalação de termostatos inteligentes, e também a parte de segurança relacionada a entrada e saída de usuários da edificação. Pela perspectiva energética, é benéfica a utilização destes equipamentos em áreas que ficam frequentemente ociosas - como áreas comuns de edificações multifamiliares e, salas de reunião de escritórios - visando reduzir o desperdício e consequentemente custos desnecessários durante a operação. Outra aplicação potencial é a sua vinculação a programas de resposta pela demanda, permitindo o deslocamento de carga em horários de ponta.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A maioria dos equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede disponíveis comercialmente é voltado para residências, resultando então em uma maior aplicabilidade nas tipologias de residências unifamiliares, multifamiliares e de habitação de interesse social. Contudo, Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede voltados para AVAC e segurança também podem ser extrapolados para implementação em edificações comerciais, de serviços e até mesmo públicas, tendo em mente que dependendo do porte um *Building Management System* pode ser mais vantajoso.

Aplicativos de resposta da demanda, conscientização e gamificação

Na fase de operação a melhoria de informações proporcionadas ao consumidor é um benefício importante e evidente. Relaciona-se com o uso de Sistemas de gestão predial (BMS), os aplicativos e controles inteligentes, que comunicam consumo e qualidade energética. Este *feedback* pode ser feito em tempo real (*feedback* direto) e/ou de forma periódica, com processamento de dados e relatórios para mostrar tendências (*feedback* indireto). É essencial proporcionar a visibilidade do consumo, por meio do uso de uma interface de fácil utilização pelos usuários (de acordo com sua “alfabetização energética”), proporcionando as informações necessárias, sem sobrecarregar o usuário com uma grande quantidade de dados. Informações importantes a serem mostradas incluem curvas de carga, demanda mínima e máxima, comparações com períodos anteriores, informações de custo, emissões de CO₂, etc. Outra possibilidade é usar medidores que replicam uma parte deste funcionamento, sem que seja necessária a instalação de novos medidores inteligentes.

A resposta da demanda envolve a atuação dos equipamentos do usuário final como ferramenta para reduzir picos de demanda. A proposta não é alterar o consumo energético total, mas reduzi-lo nos horários de pico e, por conseguinte, diminuir os custos de geração e distribuição energética. Há formas simples e analógicas de DR, como termoacumulação em tanques de água gelada para evitar uso de *chillers* em horários de ponta, por exemplo. A integração com medidores inteligentes, associada a restrições relacionadas a modelos de tarifação flexível, abre a possibilidade do controle automatizado de demanda pelos usuários em diversos níveis, desde a simples utilização de um display dinâmico e interativo para que os usuários respondam manualmente às alterações de custo de energia (o que requer a funcionalidade de comunicação bidirecional dos medidores inteligentes); passando por dinâmicas de estímulo também interativas com estratégias de gamificação; até a interligação de equipamentos eletrônicos com os medidores e, por meio do uso de protocolos inteligentes, programar desligamentos quando o valor da tarifa estiver acima de um parâmetro pré-determinado. Outro caminho é criar uma automação direta, em que a concessionária de energia assume controle de algumas grandes cargas e tem a possibilidade de atuar nos sistemas de forma a não precisar da intervenção do usuário, para controlar e estabilizar as cargas na rede elétrica, o que requer alguma compensação financeira evidente para o usuário.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A resposta à demanda automatizada pode ser aplicada a todas as tipologias de edificação, desde que haja base legal, tarifação dinâmica, medidores inteligentes compatíveis e dispositivos inteligentes (ou tomadas inteligentes) que permitam o desligamento remoto gerenciado por algum sistema, desde aplicativos e controles inteligentes até BMS. Claro que edificações de maior porte (multifamiliares, públicas, comerciais e de serviços) e com mais ativos energéticos, como sistemas de geração distribuída, tanques de termoacumulação, bancos de baterias, etc. apresentam mais resiliência e podem absorver múltiplos horários de ponta ou períodos mais longos de tarifação desfavorável.

Computação em Nuvem

Durante a operação, a opção pelo uso de IaaS permite que não seja necessário ter *datacenters* na edificação.

Datacenters consomem muita energia (relacionada principalmente a sistemas específicos de controle de temperatura), requerem muita manutenção e controle de infraestrutura, que são providos por equipes de tecnologia da informação. Necessitam de estruturas replicadas para *backup* e demandam cuidado adicional com a segurança digital e física, uma vez que armazenam informações sensíveis. Desse modo, a contratação de computação em nuvem, além de transferir riscos, possibilita que empresas especializadas construam seus *datacenters*, com projetos altamente especializados e energeticamente eficientes, localizados longe dos centros urbanos. A combinação entre esses fatores reduz as ilhas de calor nas cidades e proporciona considerável economia de energia e menor pegada de carbono não só ao edifício, mas ao sistema como um todo. Além disso, ter um serviço seguro para hospedar todos os softwares que regem os *hardwares* que compõem a camada digital da edificação é de suma importância para possibilitar auferir quaisquer ganhos de eficiência energética oriundos da tecnologia, bem como permite um nível mais alto de automação com maior flexibilidade e menor necessidade de cabeamento, dado que a plataforma de controle não precisa ser local, bastando a existência de uma rede sem fios de boa qualidade e um dispositivo de interface digital para obter informações e, eventualmente, realizar comandos.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A Computação em Nuvem, surgindo então como uma alternativa aos *datacenters*, tem maior aplicabilidade às tipologias comerciais, de serviços e públicas, contudo, pelo seu baixo custo de implementação atual pode também ser vantajoso para residências multifamiliares e de habitação de interesse social, facilitando a gestão entre os múltiplos proprietários. Em residências unifamiliares, por haver um menor controle, não se faz tão necessário, salvo em casos em que se almeja a obtenção de alguma certificação e um backup na nuvem se torna uma garantia de que tais dados não serão perdidos.

2.1.4 FASE DO CICLO DE VIDA: Reforma

A fase de reforma refere-se à adaptação do edifício para alguma demanda específica, e tem crescido em importância nas últimas décadas, seja impulsionada pela preocupação com a sustentabilidade e economia de energia ou pelo movimento do setor imobiliário no sentido de alterar a finalidade de edificações em razão de novas oportunidades comerciais. Presencia-se, por exemplo, a alteração de edifícios comerciais e hotéis para edifícios residenciais multifamiliares, notadamente em regiões mais centrais das

grandes cidades. Esta fase se utiliza tanto das tecnologias associadas a projeto e construção como das informações agregadas obtidas durante a operação.

Apresenta-se, a seguir, a matriz morfológica das soluções digitais para a fase de reforma. Na sequência, descrevem-se as tecnologias e sua aplicabilidade referentes às tipologias de edificações e domínios abordados neste estudo.

Quadro 4 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de reforma. Fonte: Elaboração própria.

Reforma					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Fluidodinâmica computacional [CFD] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Impressão 3D Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 74] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Fluidodinâmica computacional [CFD] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Impressão 3D Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Fluidodinâmica computacional [CFD] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Impressão 3D Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Fluidodinâmica computacional [CFD] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Impressão 3D Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Fluidodinâmica computacional [CFD] Simulação de iluminação natural e artificial [116] Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Impressão 3D Realidade Aumentada <i>Blockchain</i>
AVAC	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético [83] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Fluidodinâmica computacional [CFD] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i>

Quadro 4 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de reforma. (Continuação)

Reforma					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Simulação de iluminação natural e artificial Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> Computação em Nuvem 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 104] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [104] Simulação de iluminação natural e artificial [116] Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i>
Aquecimento de água	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> Realidade Aumentada 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> Realidade Aumentada
Equipamentos, cargas de tomada	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Modelagem Energética da Edificação (BEM) Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV) <i>Blockchain</i>
Infraestrutura predial	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 116; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 116; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para análise de ciclo de vida (ACV) [83] Realidade Aumentada <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 116; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [83] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 116; 117] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Sistemas de gestão de portfólio energético Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [83] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10; 74] Modelagem Energética da Edificação (BEM) [117] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [83] <i>Blockchain</i>

Quadro 4 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de reforma. (Continuação)

Reforma					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] • Modelagem Energética da Edificação (BEM) • Sistemas de Gestão de Portfólio Energético [21] • Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) • <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] • Modelagem Energética da Edificação (BEM) • Sistemas de gestão de portfólio energético [21] • Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) • <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] • Modelagem Energética da Edificação (BEM) • Sistemas de gestão de portfólio energético [21] • Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) • <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] • Modelagem Energética da Edificação (BEM) • Sistemas de gestão de portfólio energético [21] • Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) • <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] • Modelagem Energética da Edificação (BEM) • Sistemas de Gestão de Portfólio Energético [21] • Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) • <i>Blockchain</i>

Modelagem da Informação da Construção (BIM)

[5-10; 103; 116; 117]

O modelo BIM e suas bases de dados associadas, mantidos atualizados durante a operação do edifício, carregam consigo um conjunto de informações extremamente útil para o projetista, bem como um rico histórico de desempenho que pode ser usado como base para o projeto de reforma, seja visando à adaptação a requerimentos específicos, como de eficiência energética, sustentabilidade, acessibilidade ou ainda à alteração de finalidade da edificação. Além disso, carrega todas as vantagens já descritas para a etapa de projeto.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A tecnologia de BIM na fase de reforma também está em um estágio maduro, principalmente pela facilidade da plataforma em “fasear” a construção e explicitar os elementos a serem construídos e demolidos. Algumas plataformas, inclusive, podem gerar este desenho técnico de maneira automática, o que torna o processo de reforma mais rápido e com menos chance de erros. Apresenta algumas vantagens semelhantes à etapa de projeto, como a facilidade de compatibilização de projetos complementares e a realização de orçamentos. Sua aplicação também está mais voltada para projetos de maior porte, sejam eles comerciais e de serviços, públicas, residenciais multifamiliares e habitações de interesse social. Em casos de edifícios tombados (independente da instância), sua utilização pode ser uma ferramenta crucial para o aumento da eficiência energética, para a redução de erros e para a garantia da preservação do patrimônio. Para pequenas construções, como residências unifamiliares, apesar de serem visíveis benefícios pela utilização da plataforma BIM, a viabilidade comercial precisa ser avaliada. Fatores influenciadores são o porte e o fato de reformas de residências unifamiliares envolverem geralmente apenas um profissional ou uma equipe consideravelmente menor, muitas das vezes não requerendo uma compatibilização tão delicada, o que não justificaria os custos associados à utilização do BIM.

Modelagem Energética da Edificação (BEM) [23]

Com a utilização do BEM em uma reforma, pode-se mensurar o consumo energético da edificação existente (linha de base) e comparar com propostas de modificações a serem realizadas, de forma a validar as melhorias no desempenho energético da edificação. Tal método também pode ser aplicado para avaliar os benefícios trazidos para conforto térmico dos usuários.

Com relação aos demais domínios em que a Modelagem Energética da Edificação tem aplicação, estes se assemelham consideravelmente à etapa de projeto. Destaca-se a simulação do consumo de eletricidade em grupo ou individualmente, de forma a expor aqueles com maior potencial de melhoria. Também há a possibilidade de integração com *Machine Learning* para otimização mono ou multiobjetivo.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

A exemplo da etapa de projeto, a utilização de simulação termoenergética ajuda na concepção de envoltórias com maior eficiência energética, conforto térmico e lumínico aos usuários. Contudo, é necessário enfatizar a limitação do escopo dos projetos de reforma, que varia caso a caso, sendo menor quando se trata de mudança de finalidade ou quando envolve grandes alterações de fachada e AVAC. Por necessitar de conhecimento com relação não só aos softwares de simulação, mas também ter bastante fluência relacionada à construção civil, os profissionais capacitados para a realização de modelagens energéticas de edificações para reforma são escassos, se limitando a projetos de maior porte, alto padrão ou que almejam a obtenção de alguma certificação ambiental. Pode-se considerar que as tipologias que apresentam maior interesse na tecnologia são comercial e de serviços e o residencial, para os quais certificações e um menor custo de operação podem ser utilizados como estratégia de valorização do imóvel.

Fluidodinâmica Computacional (CFD) [26-32; 34; 36-38]

O CFD otimiza o desenvolvimento dos projetos de reforma com base em critérios como ótima distribuição de fluxo, gerenciamento térmico eficiente e perdas mínimas de carga, possibilitando a comparação de diferentes alternativas para a tomada de decisões em diagnósticos, melhorias de processos e validações de taxas de renovação do ar, velocidade e temperatura em projetos. Permite a visualização 3D da distribuição do fluido quente ou frio no que se refere à variável desejada, sendo possível analisar o escoamento por meio de vídeos e observar os pontos críticos.

Considerações sobre a aplicabilidade de CFD a diferentes tipologias do segmento

O CFD é uma metodologia importante para prever a ventilação natural de edificações, o que é especialmente útil em edificações residenciais multifamiliares, unifamiliares e habitação de interesse social que utilizam majoritariamente tal ventilação e não o AVAC. Pode também ser utilizado para o estudo da distribuição do ar condicionado em ambientes complexos ou de alto desempenho (como *datacenters*). Contudo, seus altos custos e falta de pessoal capacitado são vistos como barreiras e acarretam a maior adoção por tipologias residenciais multifamiliares. Nas Habitações de Interesse Social, a replicabilidade pode tornar a adoção de tal ferramenta viável.

Simulação de iluminação natural e artificial [39; 41-45; 47-55]

Os softwares de iluminação oferecem uma ampla gama de recursos e funções, facilitando as avaliações para revitalização desses sistemas em edifícios existentes, seja pela necessidade de adequação da iluminação a novos padrões e normas, para melhoria do conforto dos ocupantes ou por serem sistemas com retorno econômico mais imediato para a redução dos gastos com energia.

Frequentemente, em edifícios de grande porte, a reforma da iluminação poderá fazer parte de uma combinação mais ampla de estratégias de eficiência energética e, diante do grande número de dados necessários que devem ser considerados nos cálculos luminotécnicos e das diversas possibilidades de soluções, se faz necessário o uso de ferramentas mais rápidas e assertivas para a tomada de decisão sobre qual opção a ser executada, principalmente quando envolve o emprego da luz natural. Além disso, contribuem para a obtenção do equilíbrio financeiro entre os custos da reforma e a economia de energia a ser alcançada.

Considerações sobre a aplicabilidade de simulação de iluminação a diferentes tipologias do segmento

As simulações de iluminação natural e artificial, como na fase de projeto, podem impactar consideravelmente na eficiência energética e conforto lumínico em toda a operação subsequente, sendo mais aplicáveis a projetos de grande porte ou relacionados à etiquetagem/certificações, principalmente comerciais e de serviços, além de pesquisas acadêmicas. Infelizmente, dada a escassez de profissionais capacitados, ainda há baixa aplicação em projetos de edificações públicas, residenciais multifamiliares, unifamiliares e de habitação e interesse social.

Sistemas de gestão de portfólio energético [21; 57-60; 83]

Por vezes, a falta de entendimento sobre os custos e os benefícios dos projetos de energia renovável, eficiência energética e/ou cogeração em edifícios existentes constitui-se em barreiras à sua implementação e integração, o que pode ser superado com o auxílio dos softwares de análise de projetos que reúnem todos os aspectos a serem avaliados em uma única plataforma. As ferramentas digitais contribuem especialmente no desenvolvimento de estudos e soluções otimizadas para os sistemas AVAC, aquecimento de água, infraestrutura predial e fornecimento, geração e armazenamento de energia.

Uma vez executados os projetos de reforma com viabilidades técnica e financeira comprovadas, por meio dos programas de gerenciamento integrado (balanço entre os consumos e a produção de energia) também é possível aos gestores das instalações trabalharem de forma holística para o monitoramento contínuo do desempenho energético do edifício. Podem, ainda, estabelecer metas de produção de energia limpa, redução de gases de efeito estufa e eficiência energética, dentre outras, e programar alertas de anormalidades (se a produção de energia renovável está abaixo do previsto, por exemplo), fornecendo informações imediatas para o setor operacional entrar em ação e garantir que os investimentos previstos se mantenham no longo prazo.

Os *displays* dessas plataformas também podem servir de informativos para funcionários e visitantes sobre a qualidade ambiental dos espaços, tanto do edifício quanto fora dele.

Considerações sobre a aplicabilidade a diferentes tipologias do segmento

Aplica-se fundamentalmente a edificações de qualquer tipologia que possuam ou estejam em fase de avaliação da implementação de sistemas de geração distribuída e aquecimento solar térmico de água. Entretanto possuem um escopo ampliado para edificações de maior porte que detêm ou tenham interesse em instalar outros ativos consumidores ou produtores de energia, como grandes sistemas de AVAC, tanques de termoacumulação, bombas de calor, sistemas de cogeração etc., portanto, fundamentalmente para as tipologias de edificações públicas, comerciais e de serviços.

Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [2; 13; 61; 62]

É importante destacar que a própria opção por uma reforma ao invés de uma demolição seguida de projeto novo já pode ser produto de uma Avaliação do Ciclo de Vida, assim como a definição de que partes da edificação se manterão e quais serão demolidas. Com relação aos domínios, geralmente há uma maior limitação na intervenção da envoltória e uma priorização da modificação de isolamentos térmicos e de vidros que das vedações em si. Os sistemas de iluminação, infraestrutura predial e AVAC em geral apresentam grande potencial de intervenção em todas as tipologias.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares para ACV a diferentes tipologias do segmento

A utilização da avaliação do ciclo de vida (ACV) está mais associada às características da reforma e independente da tipologia do segmento em projeto. Isso porque a decisão de manter uma edificação, em lugar de demoli-la, já deveria ser objeto de uma ACV. Contudo, observa-se que em geral se assume que a reforma terá menor impacto ambiental que a demolição e um projeto do zero, o que não necessariamente é verdade em todos os casos. Na avaliação do ciclo de vida durante a reforma, são grandes as semelhanças com a etapa de projeto: seu alto custo atual para realização limita suas aplicações a projetos de maior porte, como comerciais e de serviços, e também projetos residenciais de elevado padrão. A sua replicabilidade se torna ainda mais complexa nesta fase, por não só levar em consideração as variações de local como também as diferentes necessidades das reformas, o que torna a extrapolação de apenas uma ACV em larga escala complexa. Esta complexidade cresce ainda mais se houver alteração da finalidade da edificação.

Impressão 3D

Em reformas, impressoras *in loco* permitem abordagens específicas para o melhor aproveitamento (e minimização de demolição local) das partes existentes do edifício, dado que cada peça pode ser exclusiva, bastando que, para tanto, sejam tridimensionalmente modeladas. Isto impacta na redução direta da geração de resíduos e na redução do uso de maquinário de grande porte.

Considerações sobre a aplicabilidade de impressão 3D a diferentes tipologias do segmento

Devido ao seu alto custo, a sua aplicação atual se restringe a projetos de alto padrão ou àqueles em que seu custo consegue se diluir, como comerciais e de serviços ou em centros de serviços compartilhados para múltiplas unidades. Ainda é baixa a utilização em edifícios residenciais multifamiliares, habitação de interesse social, unifamiliares e públicos pela questão financeira, apesar da tecnologia ter capacidade de responder às demandas desses mercados. Destaca-se que a Impressão 3D é muito útil em projetos de reforma de patrimônios tombados, onde é necessário refazer algum elemento exatamente como este era anteriormente, devido à sua precisão.

Realidade Aumentada [17; 66; 73]

Permite a sobreposição de orientações na visão dos funcionários, como quais elementos serão construídos e quais serão demolidos por meio da visualização da planta de construção e demolição, o que reduz consideravelmente as chances de erro e custos adicionais. Também pode ser utilizado para realizar a comunicação entre trabalhadores e mostrar potenciais riscos, como gases, e aumentar a segurança do canteiro de obras. Devido a sua relação com múltiplos domínios e a necessidade de visualização de diferentes desenhos técnicos da edificação, sua integração com o *Modelagem da Informação da Construção* (BIM) traz diversos benefícios.

Considerações sobre a aplicabilidade de realidade aumentada a diferentes tipologias do segmento

A Realidade Aumentada permite um maior controle do que será realizado na reforma tanto na demolição/construção quanto na instalação de complementares, o que se mostra muito útil em grandes projetos como edifícios comerciais e de serviços, públicos e residenciais multifamiliares. Apesar de habitações de interesse social (HIS) variar de porte, sua replicabilidade torna a utilização da Realidade Aumentada viável. Todas estas tipologias permitem a diluição do custo de implementação da tecnologia, que é causada tanto pela criação dos desenhos técnicos a serem visualizados, quanto pelos equipamentos de visualização da Realidade Aumentada pelos funcionários. Já em projetos menores, como o controle da reforma é mais simples, não há necessidade de adoção da tecnologia que justifique seu custo.

Blockchain [64]

Em reformas, as aplicações assemelham-se às da fase de projeto. Em edifícios já construídos e operados utilizando a tecnologia, há o benefício adicional de ter histórico registrado e, conseqüentemente, informações importantes sobre a integridade dos materiais e sistemas instalados, facilitando a tomada de decisão sobre o que é possível ou não manter no edifício.

Considerações sobre a aplicabilidade de Blockchain a diferentes tipologias do segmento

Visto que o *Blockchain* está associado à obtenção de dados da edificação ao longo da sua operação para a elaboração de um projeto de reforma, sua aplicação maior é em edificações comerciais e de serviços onde há maior controle e gestão da edificação, como, por exemplo, a utilização de BMS.

Softwares de Gerenciamento Ágil

Esta fase pode ser tão complexa quanto a de construção dependendo do nível de reforma que se deseja implementar na construção existente, principalmente considerando a tendência nacional e internacional de readequação de usos de edificações existentes.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares de gerenciamento Ágil a diferentes tipologias do segmento

A utilização dos métodos de gerenciamento ágeis colabora com as mesmas características já mencionadas na fase de construção, tendo foco de utilização nas tipologias comerciais, públicas e multifamiliares. No entanto, espera-se que estes métodos não fiquem populares em pequenos projetos de reformas tipicamente nas tipologias de residências unifamiliares e de interesse social.

Computação em Nuvem

Durante a fase de reforma os serviços de computação em nuvem proporcionam os mesmos benefícios descritos para a fase de projeto, com a característica adicional de, no caso de já ser uma prática prévia à readequação, conterem as informações, parâmetros e programas usados para gerir a edificação, bem como o registro de todo o seu histórico. Isto torna possível a análise do que funcionou e o que não funcionou bem do ponto de vista energético provendo informações valiosas para os projetistas e parâmetros quantitativos de comparação, seja para a obtenção de financiamentos ou para a previsão do custo fixo médio de manutenção.

Considerações sobre a aplicabilidade da computação em nuvem a diferentes tipologias do segmento

A computação em nuvem é muito importante na reforma por demandar um maior trabalho com relação à compatibilização de projetos de instalações e, em alguns casos, controle dos órgãos de preservação do patrimônio. Porém, observa-se uma maior concentração em projetos de maior complexidade, como os comerciais e de serviços, residenciais multifamiliares e públicos e nos de Habitação de Interesse Social, sua adoção é vantajosa por permitir a ligação entre equipes de projetos em diferentes locais do país, podendo fazer trocas de conhecimento caso a reforma não seja replicável.

2.1.4 FASE DO CICLO DE VIDA: Demolição

A incorporação de tecnologias digitais nesta fase ainda está numa fase muito inicial tanto no Brasil como nos outros países. No entanto, algumas tecnologias podem ser utilizadas, provendo mais qualidade, organização, melhor direcionamento e reaproveitamento dos resíduos, aumento da segurança e redução de custos na fase de demolição.

A matriz morfológica para esta fase é exibida na sequência. Percebe-se que a relação com os domínios se refere fundamentalmente à existência de informações coletadas durante as outras fases, que possibilitam avaliações da destinação dos resíduos, do ponto de vista econômico e ambiental.

Quadro 5 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de demolição. Fonte: Elaboração própria.

Demolição					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i>
AVAC	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67]
Iluminação	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67]
Aquecimento de água	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67]
Equipamentos, cargas de tomada	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67]

Quadro 5 – Matriz morfológica das soluções digitais para a fase de demolição. (Continuação).

Demolição					
Domínios	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Infraestrutura predial	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] <i>Blockchain</i>
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67] 	<ul style="list-style-type: none"> Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10] Softwares para avaliação do ciclo de vida (ACV) [61, 62; 67]

Modelagem da Informação da Construção (BIM) [5-10]

Para a demolição, o modelo BIM reúne as informações sobre os métodos construtivos, bem como indicações sobre o que pode ser desmontado e reutilizado ou reciclado, quantitativos e volumes, o que pode ajudar a decidir a forma mais adequada de proceder a uma demolição ou desmontagem, bem como a atribuir valor comercial aos elementos aproveitáveis ou recicláveis, o que tende a reduzir drasticamente a geração de resíduos sólidos não aproveitáveis e a reinserir materiais, principalmente oriundos da envoltória, no mercado de construção civil. As informações de volumetria de material reciclável (principalmente Resíduos de Construção e Demolição - RCD) auxiliam na mobilização do canteiro, permitindo dimensionar e quantificar mais adequadamente equipamentos a serem utilizados, serviços e fornecedores a serem mobilizados.

Considerações sobre a aplicabilidade de BIM a diferentes tipologias do segmento

A utilização do modelo BIM na demolição é produto da sua utilização ao longo das etapas anteriores. Sendo assim, sua aplicabilidade é maior em projetos de grande porte, como edifícios comerciais e de serviços, públicas, residenciais multifamiliares, e ainda habitações de interesse social, quando multifamiliares ou modulares encaradas em conjunto.

Softwares para Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) [61, 62; 67]

Na etapa de demolição, a ACV é uma ferramenta útil para mensurar o impacto ambiental do funcionamento do canteiro de obras. Também pode ser utilizada para fazer escolhas mais conscientes com relação ao fim de vida dos insumos da edificação, sendo sempre preferível uma abordagem em ciclo fechado (reciclagem ou reuso) ao descarte. Um dos fatores a se atentar é a distância entre o canteiro e o local para onde será enviado o material devido ao alto potencial poluente do diesel dos caminhões.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares para ACV a diferentes tipologias do segmento

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma ferramenta viável nas tipologias residenciais multifamiliares, unifamiliares, habitação de interesse social, comerciais, de serviços e públicas. No entanto, como edificações de grande porte geram maior impacto ambiental na sua demolição, estas devem estar mais atentas à realização de ACVs no final de sua vida, independente do seu uso.

Realidade Aumentada [17; 66; 73]

Possibilita a comunicação e a orientação entre os trabalhadores durante a execução de tarefas, podendo indicar quais elementos demolir primeiro e quais são estruturais. Também pode indicar quais são as melhores rotas a seguir para sair da edificação e destinar cada categoria de materiais no canteiro. Por fim, aumenta a segurança dos trabalhadores por mostrar potenciais riscos no canteiro de obras. Devido à sua relação com múltiplos domínios e à necessidade de visualização de diferentes desenhos técnicos da edificação, a sua integração com BIM agrega qualidade a esta fase.

Considerações sobre a aplicabilidade de realidade aumentada a diferentes tipologias do segmento

A Realidade Aumentada em um canteiro de obras tem é aplicável principalmente a grandes empreendimentos, como edifícios comerciais, de serviços, residenciais multifamiliares e públicos. Apesar de seu custo, também é viável em projetos de Habitação de Interesse Social pela reutilização dos equipamentos empregados, desde que haja orientação e cuidado. Devido ao pequeno porte, não é viável sua utilização em residências unifamiliares.

Blockchain

De modo similar ao relatado em reformas, é possível verificar qualidade e integridade dos materiais existentes no edifício, de modo a orientar a tomada de decisão sobre o que pode ser reutilizado, o que pode ser reciclado e o que precisa ser de fato descartado. O maior aproveitamento de itens reutilizáveis proporciona eficiência energética, na medida em que tais elementos construtivos, tais como perfis metálicos, não precisarão passar por reprocessamento industrial ou etapas energointensivas de conformação, reduzindo a pegada de carbono do empreendimento que os utilizar.

A utilização de *Blockchain* segue dois caminhos nesta fase: (i) para aquelas edificações que já se utilizavam da tecnologia para a gestão dos materiais, podem ser realizadas análises para a melhor tomada de decisão em relação à destinação, e (ii) para as que adotavam ou não a tecnologia anteriormente, para as quais pode-se categorizar a origem e composição geral de cada material extraído da construção e regular as transações feitas para removê-los do canteiro (registrando lotes, quantidades e características como *tokens* de evolução), processamento e conformação (registrando processos, consumo de energia e outros recursos) e direcionamento ao mercado (registrando características físicas e mecânicas, lotes, quantidades e destinação).

Considerações sobre a aplicabilidade de *Blockchain* a diferentes tipologias do segmento

Aplica-se fundamentalmente a grandes canteiros, em que há grande quantidade e valor agregado nos resíduos da demolição, portanto a edificações públicas, comerciais e de serviços e residenciais multifamiliares.

Softwares de Gerenciamento Ágil

Para os projetos de grandes demolições, a questão da logística é crucial, principalmente no manejo dos resíduos de construção e demolição. Nesta fase, esta tecnologia pode se associar com as tecnologias BIM que guardam as informações sobre os métodos construtivos, materiais e seus desmontes e devem auxiliar na forma mais adequada de proceder tais atividades com geração reduzida de resíduos.

Considerações sobre a aplicabilidade de softwares de gerenciamento Ágil a diferentes tipologias do segmento

O potencial de uso desta tecnologia nesta fase é nas tipologias comerciais e públicas, notadamente no nicho de grandes edificações e/ou em áreas muito regulamentadas em termos de demolição e resíduos.

2.2 Status quo da digitalização no segmento de edificações no Brasil e no mundo

Os quadros-resumo que são apresentados nos itens a seguir fazem referência ao status quo da disponibilidade comercial das tecnologias que podem ser empregadas em cada fase do ciclo de vida da edificação, estratificadas por tipologia. Cada tabela diz respeito a uma fase do ciclo de vida e lista para cada tipologia de edificação, uma série de tecnologias, que por sua vez são avaliadas e classificadas de acordo com a respectiva disponibilidade no mercado brasileiro e internacional. O embasamento teórico para o enquadramento do status quo e a distribuição fundamental das tecnologias em relação às tipologias de edificações e suas fases do ciclo de vida estão consolidados em um

quadro sintético (no Apêndice 3), baseado, além das buscas por referências acadêmicas, foram realizadas buscas de referências comerciais com o intuito de encontrar produtos, soluções, softwares, aplicativos, ferramentas, aplicações na web, prestadores de serviços, empresas especializadas, ou outras fontes de informação relevantes para o estabelecimento do *status quo* do mercado. Estas referências se encontram organizadas no Apêndice 4. Com as referências catalogadas, foi então possível compreender e avaliar o status atual de cada tecnologia e classificá-las com a seguinte escala de cores e significados:

Cor	Status	Significado
	Disponível comercialmente	Significa que foram encontradas referências suficientes para considerar a tecnologia disponível do ponto de vista comercial.
	Em desenvolvimento	Significa que não foram encontradas referências suficientes para considerar a tecnologia disponível do ponto de vista comercial, porém existem citações na literatura acadêmica, o que ressalta o interesse e iminente desenvolvimento do ponto de vista comercial.
	Indisponível comercialmente	Significa que não foram encontradas referências suficientes para considerar a tecnologia disponível do ponto de vista comercial, tampouco citações na literatura acadêmica que explicitem o emprego da tecnologia em questão, considerando o contexto analisado (tipo de edificação versus fase do ciclo de vida). Nessa classificação também são enquadradas as soluções digitais não pertinentes à determinada associação entre fase do ciclo de vida e tipologia da edificação.

Importante frisar que a disponibilidade de determinada solução, que se traduz na classificação do status quo, não está relacionada com a necessidade ou obrigatoriedade do uso da tecnologia na fase/tipologia de edificação analisada em determinado contexto, e sim à disponibilidade no mercado. A classificação também não levou em consideração aspectos relacionados aos custos envolvidos e possíveis restrições relacionadas, com a aquisição de insumos e serviços necessários para o emprego de determinada solução digital nos contextos analisados. A efetiva penetração das soluções digitais será abordada nos estudos de cenarização, contemplando critérios adicionais.

Na fase de projeto de edificações, Softwares, aplicativos e ferramentas empregados, bem como os serviços atrelados, são majoritariamente encontrados relacionados às seguintes soluções digitais: Modelagem Energética da Edificação, Modelagem Energética Urbana, Fluidodinâmica Computacional, Simulação de iluminação natural e artificial e Sistemas de Gestão de Portfólio Energético, Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida, Realidade Aumentada e Softwares de Gerenciamento Ágil.

Tais soluções, quando analisadas no contexto das matrizes de status quo, e quando de fato pertinentes à associação entre fase do ciclo de vida versus tipologia da edificação, estão disponíveis tanto no mercado nacional quanto em outros países em todos os contextos analisados. Entre estes, os destaques positivos com relação à disponibilidade dos fornecedores, o que pode ser traduzido em maturidade do mercado, são para as soluções em BIM, CFD e Simulação de iluminação natural e artificial. As iniciativas empregando *Blockchain* são uma realidade, porém em sua grande maioria, a solução digital é fornecida e desempenhada em parceria com empresas estrangeiras.

Na fase de construção de edificações são utilizadas amplamente soluções digitais com emprego de Softwares. Porém, não foram identificadas soluções digitais que empregam BEM/UBEM, CFD, simulação computacional para avaliação de desempenho luminoso e simulação e sistemas de gerenciamento de energias renováveis nesta fase. Foram identificadas soluções em BIM, ACV, realidade aumentada e ferramentas para gerenciamento ágil, disponíveis tanto no mercado nacional quanto em outros países, em todos os contextos analisados.

Especificamente, para as soluções digitais Impressão 3D e *Blockchain*, é possível encontrar inúmeras iniciativas em nível internacional ao passo que no Brasil ainda estão em desenvolvimento, em sua grande maioria oferecidas por *startups*.

Na fase de operação de edificações, encontra-se com mais frequência soluções digitais envolvendo dispositivos e sistemas capazes de fomentar o controle e automação de processos e serviços, envolvendo principalmente as seguintes soluções digitais: Sensores e atuadores, Interface de iluminação digital endereçável (DALI), Assistentes Virtuais, aplicativos e controles inteligentes, tomadas inteligentes, carregadores de veículos elétricos, interruptores inteligentes e equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede. Estes estão disponíveis tanto no mercado nacional quanto em outros países em todos os contextos analisados. Especificamente, para as soluções digitais relacionadas a Fachadas inteligentes e a ações de resposta à demanda, é possível encontrar inúmeras iniciativas em nível internacional ao passo que no Brasil ainda estão em desenvolvimento. Em termos de resposta à demanda, podem ser encontrados exemplos em projetos piloto de iniciativa por parte de distribuidoras de energia e pela ANEEL. Nesta fase, foram identificadas também soluções com emprego de Softwares como em BIM, ACV e sistemas de gestão de portfólio energéticos.

Na fase de reforma de edificações, por ocasião do formato de apresentação destes resultados, as classificações, e da mesma forma, as ponderações presentes na matriz possuem grande semelhança com as conclusões para a matriz de resultados para a fase de projeto. Excetuando-se pela presença das soluções em Impressão 3D, as quais igualmente como na fase de construção, estão disponíveis em nível internacional e em desenvolvimento no contexto nacional.

Na fase de demolição de edificações, nas soluções nas quais são empregados Softwares e serviços atrelados, majoritariamente encontra-se as seguintes tecnologias digitais: BIM, Softwares para ACV e Realidade aumentada. Quando analisados na esfera das matrizes de *status quo*, estão disponíveis tanto no mercado nacional quanto em outros países em todos os contextos analisados. Especificamente, para as soluções digitais em *Blockchain*, é possível encontrar inúmeras iniciativas em nível internacional ao passo que no Brasil ainda estão em desenvolvimento.

A seguir, apresentam-se os quadros de resumo com o *status quo* das principais soluções digitais disponíveis no Brasil e no mundo, por fase do ciclo de vida da edificação, considerando todas as tipologias abordadas neste estudo.

2.2.2 Status quo das soluções digitais para edificações na fase de construção

Apresenta-se no Quadro 7 o *status quo* das principais soluções digitais disponíveis no Brasil e no mundo para a fase de construção, considerando as cinco tipologias abordadas neste estudo.

Quadro 7 – Status quo das soluções digitais para a fase de construção. Fonte: Elaboração própria.

Solução digital	Status quo									
	Comerciais		Públicas		Residenciais HIS		Multifamiliar		Unifamiliar	
	Brasil	Outros países	Brasil	Outros países	Brasil	Outros países	Brasil	Outros países	Brasil	Outros países
Modelagem da Informação da Construção (BIM)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Modelagem Energética da Edificação (BEM) / Modelagem Energética Urbana (UBEM)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Fluidodinâmica Computacional (CFD)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Simulação de iluminação natural e artificial	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Sistemas de Gestão de Portfólio Energético	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Softwares para Avaliação do ciclo de vida (ACV)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Impressão 3D	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde
Realidade Aumentada	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Blockchain	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde
Softwares de Gerenciamento Ágil	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Sistemas de gestão predial (BMS)	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Sensores e atuadores	Verde	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde
Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI)	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Fachadas inteligentes / Sistemas de sombreamento dinâmicos	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Assistentes virtuais	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Aplicativos e controles inteligentes	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Interruptores inteligentes	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Computação em Nuvem	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Amarelo	Verde

2.3 Políticas de digitalização no segmento de edificações no Brasil e instrumentos implementados ou em desenvolvimento

Apresentam-se nesta seção os resultados da análise documental sobre as principais políticas e instrumentos regulatórios implementados ou em desenvolvimento no Brasil, que se relacionam ao *status quo* da digitalização do segmento de edificações, na perspectiva de aumentar a eficiência energética neste segmento. Nesse sentido, os documentos de referência foram separados em três grandes grupos, quais sejam:

- i. Políticas de eficiência energética que possam impactar o segmento de edificações;
- ii. Instrumentos regulatórios relacionados às redes elétricas inteligentes que possam ampliar a digitalização neste segmento;
- iii. Políticas diretamente ligadas à digitalização do segmento de edificações.

Em relação às políticas de eficiência energética, avaliaram-se os instrumentos que definiram o arcabouço regulatório da etiquetagem de equipamentos no Brasil, tendo como pano de fundo a Lei de Eficiência Energética. Além disso, foram descritos os principais programas de eficiência energética que existem no país, com destaque para o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural e o Programa de Eficiência Energética das Distribuidoras de Energia Elétrica. Na sequência, foi dado um foco na eficiência energética em edificações por meio da descrição do Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações. Por fim, ainda neste grupo, fez-se uma descrição dos planos que consideram a eficiência energética no contexto do Planejamento Energético, com destaque para o Plano Decenal de Eficiência Energética.

No que se refere aos instrumentos regulatórios relacionados às redes elétricas inteligentes que possam de alguma forma ampliar a digitalização no segmento de edificações e, assim, se obter maior eficiência energética,

destacam-se os instrumentos regulatórios relacionados a medidores inteligentes, geração distribuída e mecanismos tarifários de resposta à demanda (tarifa branca, por exemplo). Além disso, discute-se como a pauta da modernização do setor elétrico pode ampliar a inserção de novas tecnologias no segmento das edificações.

Em relação às políticas que podem fomentar o uso de tecnologias digitais no segmento das Edificações, estas foram divididas em três seções:

- i. Uma que versa sobre a conexão de dispositivos nas edificações, como o Plano Nacional de Internet das Coisas;
- ii. Outra abordando as políticas relacionadas às cidades inteligentes, com destaque para o Plano Nacional de Cidade Inteligente;
- iii. Uma que aborda a questão do ciclo de vida dos dados, onde foi descrita Estratégia Nacional de Disseminação da Modelagem da Informação da Construção (BIM).

As políticas discutidas nesta seção encontram-se sintetizadas no Quadro 11. Além disso, apresenta-se a linha do tempo com os principais instrumentos regulatórios agregados em três grupos, conforme legenda de cores:

- Eficiência energética (verde);
- Redes elétricas inteligentes (cinza);
- Digitalização de edificações (azul).

Vale ressaltar que, a maior parte das políticas listadas já se encontra implementada, com exceção do Plano Decenal de Eficiência Energética (PDEF) e da Política Nacional de Cidades Inteligentes (PNCI).

O Quadro 11 sintetiza principais políticas e instrumentos regulatórios implementados ou em desenvolvimento no Brasil relacionadas ao objetivo deste estudo. Já a Figura 1 mostra esquematicamente a linha do tempo de políticas de digitalização no segmento de edificações no Brasil e instrumentos implementados ou em desenvolvimento.

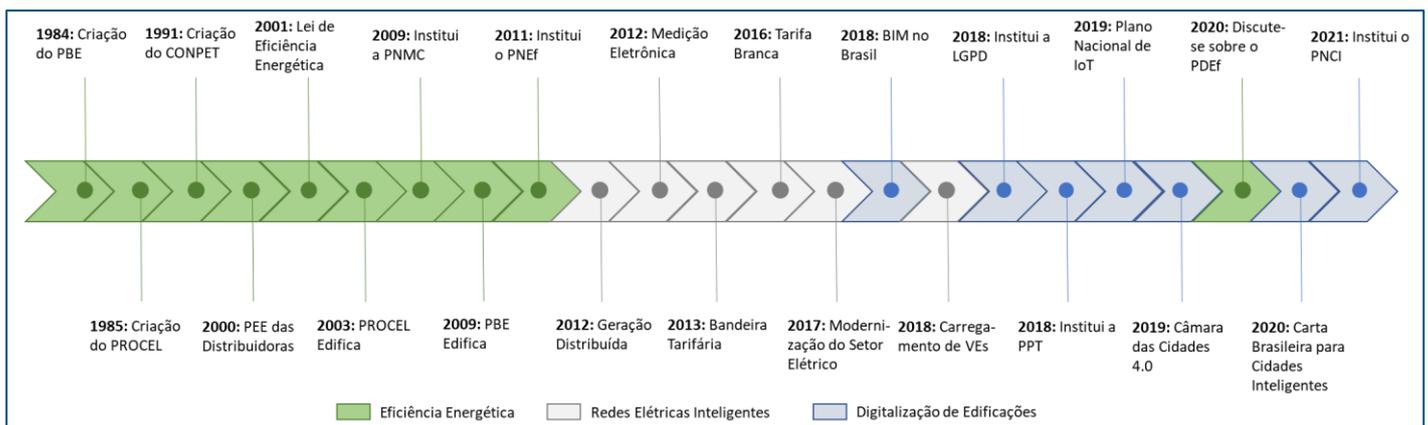


Figura 1 – Linha do tempo das políticas implementadas ou em desenvolvimento no país. Fonte: Elaboração própria.

Quadro 11 – Síntese das políticas implementadas ou em desenvolvimento no país. Fonte: Elaboração própria.

Código	Área predominante	Políticas e instrumentos implementados ou em desenvolvimento	Instrumentos regulatórios
1	Eficiência Energética	Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE	Programa criado pelo Inmetro em 1984
2	Eficiência Energética	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL	Portaria Interministerial nº 1.877/1985
3	Eficiência Energética	Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural - CONPET	Decreto Presidencial de 18 de Julho de 1991
4	Eficiência Energética	Programa de Eficiência Energética das Distribuidoras de Energia Elétrica - PEE	Lei nº 9.991/2000 e Lei nº 13.280/2016
5	Eficiência Energética	Lei de Eficiência Energética	Lei nº 10.295/2001, Decreto nº 4.059/2001 e Decreto nº 9.864/2019
6	Eficiência Energética	Procel Edifica	Lançado em 2003 pela ELETROBRAS/PROCEL
7	Eficiência Energética	Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC	Lei nº 12.187/2009, Decreto nº 7.390/2010 e Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC Brasil, 2015)
8	Eficiência Energética	PBE Edifica	Portarias Inmetro nº 372/2010, nº 17/2012, nº 18/2012 e nº 42/2021, e ABNT NBR 15.575-1/2021
9	Eficiência Energética	Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf	Portaria MME nº 594/2011
10	Redes Elétricas Inteligentes	Geração Distribuída	Resoluções Normativas ANEEL nº 482/2012, nº 687/2015, 786/2017 e Projeto de Lei nº 5.829/2019
11	Redes Elétricas Inteligentes	Regulamentação da Medição Eletrônica	Resoluções Normativas ANEEL nº 502/2012 e nº 863/2019
12	Redes Elétricas Inteligentes	Bandeiras Tarifárias	Resolução Normativa ANEEL nº 547/2013
13	Redes Elétricas Inteligentes	Tarifa Branca	Resolução Normativa ANEEL nº 733/2016
14	Redes Elétricas Inteligentes	Modernização do Setor Elétrico	Consulta Pública nº 33/2017, Portarias MME nº 187/2019 e 403/2019
15	Digitalização de Edificações	Estratégia Nacional de Disseminação do <i>Modelagem da Informação da Construção (BIM)</i>	Decretos nº 9.983/2019 e nº 10.306/2020
16	Redes Elétricas Inteligentes	Carregamento de Veículos Elétricos (VEs)	Resolução Normativa ANEEL nº 819/2018
17	Digitalização de Edificações	Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais - LGPD	Lei nº 13.709/2018 e nº 13.853/2019
18	Digitalização de Edificações	Políticas Públicas de Telecomunicações - PPT	Decreto nº 9.612/2018
19	Digitalização de Edificações	Plano Nacional de Internet das Coisas (IoT)	Decreto nº 9.854/2019
20	Digitalização de Edificações	Câmara das Cidades 4.0	Lançada em Dez/2019 pelo MCTI
21	Eficiência Energética	Plano Decenal de Eficiência Energética - PDEf	Aprovado pelo 2º Plano de Aplicação de Recursos do PROCEL (2º PAR)
22	Digitalização de Edificações	Carta Brasileira para Cidades Inteligentes	Lançada em Dez/2020 no <i>Smart City Session 2020</i>
23	Digitalização de Edificações	Política Nacional de Cidades Inteligentes - PNCI	Projeto de Lei nº 976/2021

2.3.1 Políticas de eficiência energética que impactam o segmento de edificações

Neste item, descrevem-se as políticas de eficiência energética que impactam o segmento de edificações, sendo subdivididas em quatro grupos, a saber:

- i. Etiquetagem de equipamentos;
- ii. Programas de eficiência energética;
- iii. Eficiência energética em edificações;
- iv. Eficiência energética no contexto do planejamento energético do país.

Etiquetagem de equipamentos

Em 1984, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) iniciou o debate sobre a criação de programas de avaliação da conformidade focados no desempenho, com o objetivo de contribuir com a racionalização do uso de energia no país. Assim, neste mesmo ano foi criado o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), que adota a Etiqueta Nacional de Conservação da Energia (ENCE) para oferecer informações sobre o desempenho dos produtos no que diz respeito à sua eficiência energética. Atualmente, o PBE é composto por 27 programas de avaliação da conformidade em diferentes fases de implementação, contemplando desde a etiquetagem de produtos da linha branca, como fogões, refrigeradores e condicionadores de ar, até os veículos e as edificações.

Os programas do PBE são coordenados em parceria com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), instituído pela Portaria Interministerial nº 1.877, de 30 de dezembro de 1985, [118] e o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), criado pelo Decreto Presidencial de 18 de julho de 1991 [119]. O CONPET e o PROCEL, originalmente operacionalizados, respectivamente, pela Petrobras e Eletrobras, que premiam os produtos mais eficientes do Programa de Etiquetagem do Inmetro. O CONPET está provisoriamente sendo coordenado diretamente pelo MME. O PROCEL, segundo a lei nº 14.182/2021, deverá ser coordenado pela Empresa Brasileira de Participações em Energia Nuclear e Binacional S.A. (ENBPar).

Até 2001, o processo de etiquetagem de equipamentos era voluntário, mas em 17 de outubro deste mesmo ano, foi promulgada a Lei 10.295, conhecida como Lei de Eficiência Energética, conferindo a possibilidade do caráter mandatório do desempenho de alguns equipamentos [120]. Assim, cabe ao Poder Executivo, a responsabilidade

de estabelecer índices mínimos de eficiência energética ou máximos de consumo específico para máquinas e equipamentos consumidores de energia.

Ambos os Decretos nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001 [121] e nº 9.864, de 27 de junho de 2019, regulamentam a Lei nº 10.295 [120], que dispõe sobre uma Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Mas foi o Decreto nº 4.059/2001 que criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), que tem como atribuição estabelecer os níveis mínimos de eficiência e os respectivos Programas de Metas com indicação da evolução dos destes níveis para cada equipamento regulamentado. Além disso, criou Grupo Técnico de Edificações responsável pela promoção da eficiência energética em edificações. Por força da aplicação do Decreto nº 9.759, de 11 de abril de 2019, o Decreto nº 4.059, de 2001, foi substituído pelo Decreto nº 9.864, de 27 de junho de 2019, o qual atualizou a composição do CGIEE à nova estrutura ministerial e seus procedimentos de trabalho, bem como incorporou novas competências ao colegiado, dando-lhe maior legitimidade na implementação da Política Nacional de Conservação de Energia. Também foi atualizada a composição do Grupo Técnico para Eficientização de Energia em Edificações – o GT Edificações.

Muitos equipamentos que são usados nas edificações são aqueles de etiquetagem compulsória estabelecidos no PBE e, portanto, podem contribuir para o aumento da eficiência energética neste segmento.

Programas de eficiência energética

Além do PROCEL e do CONPET, outro instrumento bastante importante para fomentar a eficiência energética no país é o Programa de Eficiência Energética das Distribuidoras de Energia Elétrica, o PEE, tendo sido criado pela Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000 [122]. Esta lei dispõe sobre realização de investimentos tanto em pesquisa e desenvolvimento, como em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, o que inclui as distribuidoras de eletricidade. Estas empresas devem aplicar parte da sua receita operacional líquida (ROL) em projetos de eficiência energética (PEE) e de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

Atualmente, os percentuais totais para cada um dos programas são 0,5% para PEE e 0,5% para o P&D. No caso do PEE, a Lei nº 13.280, de 3 de maio de 2016, destinou parte do dinheiro de eficiência energética para o PROCEL, 20% deste recurso [123]. Assim, o PROCEL recebe desta conta, 0,1% da ROL das distribuidoras e o PEE 0,4% desta receita.

Outro instrumento regulatório que vale ser destacado é a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, instituída pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 [124]. Esta política determina que deve haver medidas para estimular o desenvolvimento de processos e tecnologias, que possam contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Além disso, devem ser definidas propostas que propiciem maior economia de energia, água e outros recursos naturais, bem como a redução da emissão destes gases e de resíduos.

O Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010, regulamenta alguns artigos da Lei nº 12.187/2009, com destaque para o plano de metas voluntárias do Brasil para redução das emissões de GEE [125]. Com o Acordo de Paris, assinado na 21ª Conferência das Partes (COP 21) em 2015, foram redefinidas as metas de redução de GEE comprometidas pelo governo brasileiro. Na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC da sigla em inglês) que foi ratificada pelo Brasil no ano de 2016, em relação ao setor de energia, o país se comprometeu, até 2030, a expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia a partir de fonte hídrica), e a alcançar 10% de ganhos de eficiência neste setor [126].

Eficiência energética em edificações

A Lei de Eficiência Energética, em seu artigo 4º, faz menção sobre a responsabilidade do Poder Executivo desenvolver mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no País. Esta talvez seja a primeira iniciativa do governo com o objetivo de trazer maior eficiência no segmento de edificações.

Foi por meio do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações - PROCEL Edifica - instituído em 2003 pelo PROCEL, que se definiram objetivos mais claros com vistas a incentivar a conservação e o uso eficiente dos recursos naturais (água, luz etc.) nas edificações, reduzindo, assim, os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente, inclusive redução de GEE [127].

No âmbito do GT-Edificações criado em 2001, no final de 2005, foi criada a Secretaria Técnica de Edificações (ST-Edificações), com competência para discutir as questões técnicas que envolvem os indicadores de eficiência energética. Em 2005, o Inmetro passou a integrar o processo por meio da criação do Comitê Técnico de Edificações, em que são discutidos e definidos os processos para obtenção da ENCE neste segmento. Assim, foi desenvolvido, no âmbito do PBE, os Requisitos Técnicos da

Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), Portarias Inmetro nº 372/2010 e nº 17/2012 e de Edificações Residenciais (RTQ-R), Portarias Inmetro nº 18/2012, assim como os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC).

Em 2017, o PROCEL/PBE Edifica, juntamente com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), lançou uma proposta de um novo método para a avaliação do desempenho energético de edificações considerando o consumo de energia primária. Foi somente em 24 de fevereiro de 2021, graças a Portaria nº 42/2021, que foram aprovados os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à eficiência energética [128]. O instrumento regulatório estabelecido para este fim é a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) que aperfeiçoou os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).

Na perspectiva de melhoria de desempenho de edificações, a Norma ABNT [NBR 15.575](#) foi criada com o objetivo de definir os requisitos mínimos de qualidade, durabilidade, segurança e desempenho para as construções habitacionais brasileiras. Dentre esses requisitos, há exigências para desempenho térmico, lumínico e acústico, que tem total relação com a eficiência energética das edificações. Esta norma foi publicada em fevereiro de 2013 e sua aplicação passou a ser obrigatória em julho desse mesmo ano. Além disso, para corrigir algumas limitações desta versão da norma dentro dos requisitos de desempenho térmico, foram feitas revisões e atualizações, que foram publicadas em 2021 [129].

Em relação às edificações do setor público, há uma série de legislações específicas para que se tenha uma melhor gestão de recursos nestas edificações, em especial, água e energia. A Instrução Normativa nº 2, de 04 de junho de 2014 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MP), torna compulsória a obtenção ENCE classe “A” nos projetos de edificações públicas federais novas ou que recebam reformas. Além disso, a Portaria SPU nº 202, de 11 de novembro de 2015, da Secretaria do Patrimônio da União ligada ao MP, dispõe sobre a obrigatoriedade de cláusulas contratuais que versem sobre acessibilidade, segurança e sustentabilidade, incluindo novas obras, nos instrumentos de destinação de imóveis da União. Esta legislação pode contribuir para que os edifícios da união sejam um exemplo de eficiência, fazendo uso, inclusive, de tecnologias digitais que tenham por finalidade alcançar maiores níveis de eficiência energética.

Eficiência energética no contexto do Planejamento Energético no Brasil

No contexto do planejamento energético brasileiro, a criação de dois planos evidencia a importância da eficiência energética para o país: o Plano Nacional de Eficiência Energética – PNEf [130] e o Plano Decenal de Eficiência Energética – PDEf [131].

A Portaria MME nº 594, de 18 de outubro de 2011, que aprovou o PNEf, serve como orientador para que se atinjam as metas de economia de energia no contexto do planejamento energético nacional [130]. Assim, graças a este instrumento regulatório, o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) e os Planos Decenais de Energia (PDEs) começaram a incorporar as políticas de eficiência energética definidas pelo governo. Neste sentido, em relação às edificações, este plano propôs linhas de ações em cinco vertentes, a saber: capacitação; tecnologia; disseminação e divulgação; regulamentação; e habitação. Especificamente, em relação à tecnologia, neste plano foi destacada a necessidade de se desenvolver sistemas de simulação computacional focados nos aspectos termodinâmicos, com vistas a simplificar os procedimentos de avaliação das edificações.

Já em relação ao PDEf, foram apresentadas propostas que cobriram uma revisão dos mecanismos de eficiência energética existentes no Brasil, bem como a indicação de novas ações transversais e específicas de setores considerados relevantes, como serviço público, edificações, transporte, indústria e agropecuária. No setor de edificações, em específico, foram avaliados os instrumentos normativos municipais, as normas técnicas voltadas a esse setor, assim como as iniciativas voltadas ao setor público e as linhas de crédito imobiliário. Além disso, foi proposta a criação de um programa de eficiência energética no gás natural, considerando o potencial de crescimento do consumo desse vetor energético em edificações [131].

Em relação ao desempenho das edificações, o PDEf propõe a simplificação da metodologia da Etiqueta PBE Edifica, a qual poderia ser baseada em *checklist*, o que, na visão proposta pelo Plano, facilitaria a adoção desta etiqueta, em especial, para edificações pequenas e simples. Além disso, apontou-se a necessidade de se definir um benchmarking energético para diferentes categorias de edificações.

Outra proposta colocada no PDEf foi a da criação de um subprograma ('Procel Eficiência Digital') relacionado a IoT (Internet das Coisas), mais direcionado ao setor residencial. Além disso, este programa ficaria responsável por auferir os ganhos de eficiência energética associada à inserção de digitalização nos processos envolvendo, por exemplo, os setores industrial e comercial, o que engloba as edificações [131].

2.3.2 Redes elétricas inteligentes e digitalização das edificações: instrumentos regulatórios

Descrevem-se a seguir os instrumentos regulatórios relacionados às redes elétricas inteligentes que possam contribuir com a digitalização das Edificações, tendo como objetivo o aumento da eficiência energética neste segmento. Este item está subdividido em quatro tópicos, quais sejam:

- i. Medidores inteligentes;
- ii. Geração distribuída;
- iii. Instrumentos tarifários de resposta à demanda;
- iv. Modernização do setor elétrico.

Medidores inteligentes

Uma das primeiras ações de digitalização focada em residências no Brasil se deu em 2003 com a instalação de medidores eletrônicos na Rede DAT (Distribuição Aérea Transversal) da distribuidora Ampla (hoje Enel Distribuição Rio). A construção desta rede tinha por objetivo mitigar o problema de perdas não técnicas (furto de energia) em comunidades de baixa renda e, para tanto, se utilizavam medidores eletrônicos, em que displays com a informação de consumo de energia eram instalados no interior das residências. Embora esta ação tenha ocorrido em 2003, somente em 2010 o Inmetro homologou medidores eletrônicos [132].

Na sequência, em 07 de agosto de 2012, por conta da entrada dos medidores eletrônicos no mercado de distribuição de energia elétrica no país, a ANEEL lançou a Resolução Normativa (REN) nº 502/2012, visando regulamentar sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B (baixa tensão) [133]. Assim, regulamentavam-se os valores de energia elétrica ativa consumida acumulada por posto tarifário, bem como a identificação do posto quando existisse. Esta resolução também contribuiu para que a regulamentação da tarifa branca pudesse acontecer mais tarde em 2016. Em 10 de dezembro de 2019, a REN nº 502/2012 [133] foi revogada, sendo aprimorados os procedimentos de medição e leitura pela Resolução nº 863/2019. [134].

Ainda do ponto de vista da medição eletrônica e inteligente, a REN nº 819, de 5 de julho de 2018 estabeleceu os procedimentos e as condições para a realização de atividades de recarga de veículos elétricos por distribuidoras de energia elétrica e demais interessados [135]. Esta resolução pode trazer um grande avanço para medição inteligente, uma vez que as estações de recarga têm um conjunto de Softwares e equipamentos utilizados

para o fornecimento de corrente alternada ou contínua ao veículo elétrico, sendo instalado em um ou mais invólucros, com funções especiais de controle e de comunicação. Estes equipamentos de medição, além de serem instalados em postos de recarga específicos, são muitas vezes integrados às edificações.

Geração distribuída

Outra política que se beneficiou das diretrizes definidas pela REN nº 502/2012, por permitirem as medições em postos horários, foi a da geração distribuída. A REN nº 482, de 17 de abril de 2012, regulamenta a micro e minigeração distribuída, que se justificam pelos potenciais benefícios que a geração distribuída pode proporcionar ao sistema elétrico [136]. Entre eles, destacam-se o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; o baixo impacto ambiental; a redução no carregamento das redes; a minimização das perdas técnicas e não técnicas; e a diversificação da matriz energética. Uma das tecnologias de geração distribuída que conseguiu criar um grande mercado, após a publicação desta Resolução, foi a energia solar fotovoltaica que, muitas vezes, é integrada diretamente às edificações.

A ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687 em 24 de novembro de 2015 revisando a REN nº 482/2012, com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração e aumentar o público-alvo de consumidores que tenham geração distribuída [137]. Além disso, a REN nº 786, de 17 de outubro de 2017, ampliou a potência dos sistemas de geração a partir de fontes hídricas [138].

Uma contribuição importante desta regulamentação foi a possibilidade de o consumidor gerar sua própria energia elétrica e ceder o excedente de energia por meio de 'empréstimo' gratuito à distribuidora local, sendo esta energia posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Este sistema é denominado sistema de compensação e o consumidor tem até 60 meses para consumir esta energia 'emprestada' à distribuidora.

Para viabilizar tecnicamente este sistema de compensação, é necessário que a concessionária faça a adequação do sistema de medição destes consumidores, pois é imprescindível que um medidor bidirecional seja instalado. Esta nova tecnologia de medição viabiliza a inserção da geração distribuída nos edifícios do Brasil, modernizando a forma de consumir energia. Vale destacar a publicação da Lei nº 14.300/2022 em 07 de janeiro de 2022 que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Além de estabelecer um escalonamento da compensação de alguns componentes tarifários [139].

Instrumentos tarifários de resposta à demanda

Há dois instrumentos de resposta à demanda que merecem ser mencionados, já que medidores inteligentes podem contribuir para maior efetividade desta política. São estes: as Bandeiras Tarifárias, regulamentada pela REN nº 547, de 16 de abril de 2013 [140]; e a Tarifa Branca, regulamentada pela REN nº 733, de 6 de setembro de 2016 [141].

A Bandeira Tarifária é um mecanismo de resposta à demanda que condiciona o aumento da tarifa ao despacho da geração térmica, causado pela redução da disponibilidade de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Enquanto a bandeira verde não implica em cobrança adicional de tarifa, as bandeiras amarela ou vermelha, quando acionadas, implicam tarifas de maior valor, devido ao maior custo de geração das termelétricas.

Já a Tarifa Branca é uma tarifa horária que se destina ao Grupo B, em caráter opcional. Esta tarifa tem três postos tarifários de acordo com a demanda horária das distribuidoras, a saber:

- i. Fora ponta;
- ii. Horário ponta;
- iii. Intermediário.

Enquanto o custo da energia fora da ponta é mais barato que na tarifa convencional, nos horários de ponta e intermediário, a tarifa é mais cara. Esta tarifa necessita de instrumentos de medição que sejam capazes de medir estes postos tarifários. Assim, há a necessidade de se instalar medidores eletrônicos nas unidades consumidoras demandantes desta tarifa. Com a ajuda de medidores eletrônicos ou inteligentes é possível que o consumidor acompanhe seu consumo e controle o uso dos equipamentos, contribuído para a conservação de energia.

Além destes dois instrumentos já consolidados, foram abertas as discussões sobre Tarifa Binômica para consumidores de baixa tensão, por meio da Audiência Pública nº 59/2018 [142], e a modalidade do Pré-pagamento de Energia Elétrica, por meio da Consulta Pública nº 16/2017 [143].

Modernização do setor elétrico

Por meio da Consulta Pública nº 33, de 05 de julho de 2017 [144], foram abertas as discussões para o aprimoramento do marco legal do setor elétrico brasileiro, haja vista que as bases do modelo regulatório do setor elétrico brasileiro vigente data de 2004 (Lei nº 10.848/2004) [145]. Com os resultados desta consulta, coube ao Ministério de Minas e Energia, por meio da Portaria MME 403, de 29 de outubro

de 2019 [146], instituir o Comitê de Implementação da Modernização do Setor Elétrico no âmbito deste Ministério, com a finalidade de viabilizar a efetiva execução do plano de ação para o aprimoramento do setor elétrico, objeto da Portaria MME nº 187, de 4 de abril do mesmo ano [147].

Uma das vertentes de atuação dos grupos de trabalhos criados pelo MME relacionados à modernização do setor elétrico, diz respeito à "Inserção de Novas Tecnologias". Dentre as tecnologias analisadas, há soluções de armazenamento, usinas híbridas, energias dos oceanos, eólica *offshore* e recursos energéticos distribuídos, além de serviços ancilares. Assim, para cada uma dessas fontes e tecnologias, buscou-se identificar as barreiras atuais à sua adoção, bem como apontar planos de ações para fomentar a participação destas tecnologias na matriz de energia elétrica brasileira.

Cabe destacar aqui, os recursos energéticos distribuídos (geração distribuída, veículos elétricos, resposta da demanda e eficiência energética) e as soluções de armazenamento de energia (em especial baterias e hidrogênio) que têm total interseção com o segmento de edificações e demandam cada vez mais tecnologias digitais.

2.3.3 Políticas que influenciam no aumento da digitalização no segmento de edificações

Apresentam-se, a seguir, as políticas que influenciam no aumento da digitalização no segmento de edificações, em torno de três temas, a saber:

- i. Conexão de dispositivos;
- ii. Cidades inteligentes;
- iii. Ciclo de vida dos dados.

Conexão de dispositivos

O Decreto nº 9.612, de 17 de dezembro de 2018, dispõe sobre as Políticas Públicas de Telecomunicações (PPT), que têm como principais objetivos promover o acesso às telecomunicações em condições econômicas que viabilizem o uso e a fruição dos serviços, especialmente para a expansão do acesso à internet e a inclusão digital, garantindo à população o acesso às redes de telecomunicações. Este Decreto define uma das bases do leilão de 5G, cujo edital foi aprovado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) em setembro de 2021 [148].

A introdução da tecnologia 5G será importante, pois pode massificar e diversificar a Internet das Coisas (IoT), em segmentos como segurança pública, telemedicina, educação a distância, cidades inteligentes, edificações,

automação industrial e agrícola, entre outros. A exemplo do que ocorreu com o 4G, o 5G deve introduzir diferentes modelos de negócios e criar muitas oportunidades no mercado de digitalização, inclusive nas edificações.

Em relação à IoT, o Decreto nº 9.854, de 25 de junho de 2019 instituiu o Plano Nacional de Internet das Coisas (PNIC), que tem por finalidade de implementar e desenvolver a IoT no Brasil, com base na livre concorrência e na livre circulação de dados, observadas as diretrizes de segurança da informação e de proteção de dados pessoais. Com este Plano será possível melhorar a qualidade de vida das pessoas e promover ganhos de eficiência nos serviços, incrementar a produtividade e fomentar a competitividade das empresas brasileiras desenvolvedoras de IoT [149].

Cidades inteligentes

As cidades inteligentes usam a IoT para coletar dados em tempo real, visando entender melhor como os padrões de demanda por recursos estão mudando e responder a estas demandas com soluções mais rápidas e de menor custo. O 5G pode aumentar o potencial da IoT e se tornar uma força motriz para que as cidades se tornem cada vez mais inteligentes.

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, cidades inteligentes são cidades comprometidas com o desenvolvimento urbano e a transformação digital sustentáveis, em seus aspectos econômico, ambiental e sociocultural. Estas cidades atuam de forma planejada, inovadora, inclusiva e em rede, promovendo a governança e a gestão colaborativas. Além disso, utilizam tecnologias para solucionar problemas concretos, criar oportunidades, oferecer serviços com eficiência, reduzir desigualdades, aumentar a resiliência e melhorar a qualidade de vida de todas as pessoas. Como grande parte da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) nas cidades é consequência do consumo de energia das edificações, as cidades inteligentes necessitam de ter edificações cada vez mais sustentáveis que passem a utilizar tecnologias inteligentes e digitais [150].

Com o objetivo de elevar a qualidade de vida nas cidades por meio da adoção de tecnologias e práticas, que viabilizem a gestão integrada dos serviços para o cidadão e a melhoria da mobilidade, segurança pública e uso de recursos, foi lançada em dezembro de 2019, a Câmara das Cidades 4.0, que é um fórum coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e pelo MCTI, com participação de instituições públicas e privadas empresariais, governamentais e acadêmicas [150]. Assim, para debaterem e apresentarem soluções às Cidades, foram criados quatro Grupos de Trabalho (GT), sendo que

um deles tem por objetivo discutir, elaborar e consolidar propostas para o desenvolvimento e inovação tecnológica aplicadas às Cidades.

Outra iniciativa relevante, resultado de esforços coletivos para a construção de uma “estratégia nacional para cidades inteligentes”, é a “Carta Brasileira para Cidades Inteligentes”, que foi lançada em 8 de dezembro de 2020 durante o *Smart City Session 2020* [151]. Um de seus objetivos estratégicos é integrar a transformação digital nas políticas, programas e ações de desenvolvimento urbano sustentável. Assim, devem-se desenvolver projetos que utilizem mecanismos e tecnologias (inclusive digitais), com vistas a ampliar a eficiência energética de infraestruturas e edifícios urbanos [151].

Por fim, vale destacar que, está tramitando na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei 976/2021 que estabelece a Política Nacional de Cidades Inteligentes (PNCI), visando estimular o desenvolvimento das cidades inteligentes no país. Com base nesta política, os municípios deverão adotar planos de cidade inteligente aprovados por lei municipal e integrados ao plano diretor das cidades. Os cidadãos deverão participar da elaboração destes planos, indicando as transformações digitais que desejam ver implantadas em suas cidades. Esta proposta prevê ainda, o apoio federal na implantação das medidas definidas pelo município, uma vez que deve ser criado um fundo de financiamento [152].

Ciclo de vida dos dados

O Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019, dispõe sobre a Estratégia Nacional para a disseminação da Modelagem da Informação da Construção (BIM) e estabelece um ambiente adequado para investimento nesta tecnologia. Este decreto também cria o Comitê Gestor para coordenar a implementação desta estratégia. Assim, pode-se elevar o nível de confiabilidade dos projetos e processos de planejamento, já que muitos dados são armazenados e geridos, melhorando o controle das obras. Isso geraria um aumento da produtividade e economicidade na construção de edificações e infraestrutura no país [153].

Já o Decreto nº 10.306, de 02 de abril de 2020, estabelece a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional [154].

Em qualquer sistema inteligente ou digitalizado (BIM, inclusive), o ciclo dos dados é bem definido, a saber: geração, aquisição, armazenamento e processamento, incluindo neste último o estágio de análise dos dados. Com o aumento da digitalização, inclusive das edificações, deve haver um cuidado especial com os dados, especialmente os das pessoas físicas. Neste sentido foi criada a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), que dispõe sobre o tratamento de dados pessoais, nos meios digitais, inclusive, por pessoa natural ou por pessoa jurídica de direito público ou privado. A finalidade desta lei é proteger os direitos fundamentais de liberdade e de privacidade das pessoas.

Complementar a LGPD, em 08 de julho de 2019, foi promulgada a Lei nº 13.853, que cria a Autoridade Nacional de Proteção de Dados, que é um órgão da administração pública que tem a responsabilidade de zelar, implementar e fiscalizar o cumprimento LGPD em todo o território nacional [155].

2.3.4 Considerações finais sobre os instrumentos regulatórios

Pode-se concluir que, há, no Brasil, instrumentos regulatórios relevantes que possam alavancar o processo de digitalização das edificações no país com foco na eficiência energética. Entretanto, a digitalização requer investimentos vultosos, seja em novas tecnologias, infraestrutura e treinamento. Um exemplo disso é a tecnologia 5G que deve ter um leilão específico em 2021/2022.

As políticas de etiquetagem, sejam de equipamentos ou de edificações, poderão considerar o uso de tecnologias digitais para que se alcance maiores níveis de eficiência energética. Além disso, nos Planos Decenais de Eficiência Energética, maior ênfase deverá ser dada às tecnologias digitais, com esse mesmo propósito.

Além disso, as políticas relacionadas à medição inteligente deverão estar alinhadas às políticas referentes a cidades inteligentes. Os instrumentos de medição de energia devem ser introduzidos a sistemas que conectam os diversos objetos (IoT), com vistas a melhorar o gerenciamento energético das edificações nas cidades.

2.4 “Inteligência” adotada na operação das edificações no Brasil e no mundo

Apesar do termo “edifícios inteligentes” estar se popularizando, sua definição pode ser ambígua ou até mesmo vaga. Mais de trinta variações para o termo já foram contabilizadas [156] no início do século e tal número vem aumentando recentemente. Sendo assim, julgou-se necessária uma investigação mais aprofundada sobre a sua definição. Foi realizado um levantamento bibliográfico das principais definições existentes as quais são apresentadas abaixo:

- “Produção de uma arquitetura inteligente no conjunto, ao invés da utilização de componentes inteligentes. Resposta às condições climáticas por meio do bioclimatismo, porém com um viés tecnológico” [157];
- “Uma edificação com complexos sistemas de telecomunicações, gerenciamento e automação” [260]
- “Aquele que é projetado e construído para dar ambientes de qualidade para atender às necessidades do usuário a longo prazo” [158];
- “Qualquer edificação que permite uma resposta ágil e eficaz para obter seus objetivos comerciais” [159];
- “É aquele que tem um esforço interdisciplinar para integrar e otimizar suas estruturas, sistemas, serviços e gestão de forma a gerar um ambiente confortável, de baixo impacto ambiental e com o melhor custo-benefício” [160];
- “Aquele que integra tecnologia para criar um ambiente mais seguro, confortável e produtivo para seus ocupantes, enquanto simultaneamente mais eficiente durante a operação para seus proprietários” [160];

- “São capazes de obter informações e responder às suas próprias demandas de maneira integrada” [161];
- “Possuem uma ligação entre o ambiente físico e o virtual por meio da tecnologia, resultando em ambientes que são eficientes energeticamente, confortáveis e seguros para os usuários” [162].

Variações são perceptíveis entre as definições encontradas. Alguns enfatizam a necessidade de um ambiente confortável para os usuários, sem mencionar a utilização de tecnologias [158; 160]. Apesar de edificações inteligentes necessitarem de elementos individuais para seu funcionamento, o que caracteriza a inteligência na operação é o seu funcionamento de maneira integrada [157]. Enfatiza-se o papel das tecnologias para se alcançar edificações mais seguras, confortáveis e produtivas, tendo benefícios tanto para os usuários quanto para os proprietários. Percebe-se que algumas características se destacam como pontos comuns. Uma nuvem de palavras com as características mais recorrentes encontradas nas definições de “edificações inteligentes” é apresentada na Figura 2.

A análise das diversas definições nos permite perceber as diretrizes comuns que definem a inteligência adotada nas edificações, tanto no Brasil, como em outros países que são boa qualidade do projeto arquitetônico considerando as simulações das condições climáticas locais, a automação e integração do gerenciamento de equipamentos e sistemas, a tecnologia colocada a serviço do cliente em termos de informações e controle, a eficiência energética, a redução do consumo dos insumos energéticos, da sustentabilidade energética e em menor escala da integração com o entorno e com o setor elétrico.



Figura 2 – Nuvem de palavras “edificações inteligentes”. Fonte: Elaboração própria.

3. Análise de tecnologias aplicadas à gestão da demanda predial e do entorno

Este capítulo aborda as tecnologias utilizadas em quatro assuntos relacionados à gestão de demanda predial e do entorno da edificação. A gestão de equipamentos consumidores de energia e de edifícios conectados que trata das tecnologias de gerenciamento e controle, os medidores inteligentes que fazem a conexão com as redes elétricas das distribuidoras de energia elétrica, trazendo as experiências internacionais na implementação dos sistemas de monitoramento e gestão inteligente (*smart metering*).

Por fim, apresenta-se a avaliação por terceiros do uso real da energia e o nível de eficiência/sustentabilidade da edificação, através da certificação, com especial ênfase à aplicação de tecnologias de inspeção remota, conforme diretrizes estabelecidas na Norma ABNT NBR ISO 19011:2018 [4].

3.1 Gestão de equipamentos eletrodomésticos, de iluminação e climatização

A forma e quantidade de energia consumida em uma edificação dependem de diversos fatores como o comportamento dos usuários, as tecnologias dos equipamentos e de seus controles, a atuação da administração da edificação, a existência de fatores externos que interferem no impacto deste consumo como tarifas de energia com diferenciação horária de preços entre outros fatores. A finalidade de uma edificação é a realização da atividade para qual foi construída com um conforto ambiental adequado aos seus usuários, se for acrescentado a esta finalidade a condição de atendimento com menores consumo e custo de energia possíveis.

A gestão de eletrodomésticos e dos sistemas de iluminação e climatização pode ser direcionada por duas finalidades distintas e dependentes do ambiente regulatório a que estão submetidas as edificações que os contêm.

A primeira é a gestão na busca de redução de consumo de energia, neste caso três famílias de tecnologia se destacam: as direcionadas à medição de energia; as direcionadas ao gerenciamento da energia; e a tecnologia dos próprios equipamentos, se são eficientes e se permitem gerenciamento.

No âmbito das duas primeiras famílias, destacam-se as tecnologias já apresentadas no item 2.1 e detalhadas no item 2.1.3:

- Sistemas de gestão predial (BMS) [14; 39; 81; 84; 85; 87; 88; 90; 91; 93; 94; 97; 102; 107];
- Sensores, atuadores e interruptores inteligentes;
- Assistentes Virtuais [115];
- Aplicativos e controles inteligentes;
- Tomadas inteligentes [81; 84; 94];
- Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI) [14; 108-114].

Tais tecnologias digitais atuam tanto no controle de eletrodomésticos, iluminação e climatização para consumir menos energia, como na mudança de hábitos dos usuários. Aplicativos e controles inteligentes dão visibilidade às informações de consumo e orientam os usuários a economizar energia. Os controles inteligentes, assistentes virtuais e interruptores inteligentes facilitam um fácil controle desses equipamentos. Os gerenciamentos de edificações mais complexas como comerciais e públicas se utilizam das tecnologias de Sistemas de gestão predial (BMS) e Interface de Iluminação Digital Endereçável (DALI).

Em relação às tecnologias dos equipamentos e sistemas propriamente ditas, assistimos frequentemente a disponibilidade no mercado de tecnologias cada vez mais eficientes. Estas tecnologias são suportadas por uma vasta literatura e estão fora do escopo deste estudo, sendo também impulsionadas por vários instrumentos de política pública como, por exemplo, o Selo PROCEL. A tecnologia emergente de *equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede* associa a tecnologia de comunicação e

controle remoto aos eletrodomésticos, tornando-os inteligentes e, desta forma, pode ser facilmente controlado por tecnologias de gerenciamento mencionadas ou pelo próprio usuário. As tecnologias de interruptores inteligentes e tomadas inteligentes possibilitam que eletrodomésticos e sistemas que não sejam produzidos com a inteligência embarcada possam também ser controlados.

O gerenciamento de eletrodomésticos e sistemas de iluminação com o intuito de economia de energia tem seu potencial fortemente impulsionado pelas tecnologias digitais, possibilitando vencer os desafios de mudança de hábitos do usuário, gerenciamento automático das cargas e monitoramento online das grandezas importantes no consumo.

A segunda finalidade é a gestão da demanda para minimizar os custos da conta de energia elétrica. Os volumes de potência e energia requeridos se tornam importantes. Esta questão depende fortemente da regulação do sistema de energia elétrica ao qual a edificação está inserida. Atualmente no Brasil, o grupo tarifário B para consumidores atendidos na tensão abaixo de 2,3 kV possui tarifa monômnia, ou seja, tem valor constante em qualquer horário do dia, a não ser que opte pela tarifa branca que diferencia o preço da tarifa ao longo do dia, explicada no item 2.3.3. Os consumidores do grupo tarifário A recebem energia elétrica em tensão iguais ou superiores a 2,3 kV (alta tensão), utilizando ramais trifásicos, ou são atendidos por sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária. Estes consumidores não têm o mesmo preço de tarifa ao longo do ano, são subdivididos em várias classes que podem ter o valor da demanda e energia variáveis com o horário e período do ano. No grupo A, se encontram grandes shoppings e edifícios comerciais e públicos.

Para as edificações comerciais e públicas do grupo A, torna-se imprescindível utilizar as tecnologias que possam permitir que o usuário gerencie a sua carga, principalmente de climatização que nestes edifícios, correspondem geralmente a mais de 30 % do consumo, de tal forma que nos horários de tarifa mais caras, eles minimizem a demanda e energia requeridas. As tecnologias de Sistemas de gestão predial (BMS) e de sensores, atuadores e interruptores inteligentes são essenciais para esta gestão. Ver item 2.1.3.

Com a digitalização do setor elétrico, mediante a adoção de tecnologias digitais como medidores inteligentes e redes inteligentes, associada à mudança regulatória deste setor na direção de torná-lo mais flexível, abrem-se infinitas possibilidades de interação entre as edificações e o setor elétrico. Notadamente se esta flexibilidade se estender ao setor residencial.

Neste contexto futuro, a medição inteligente pode ser usada para trabalhar em estreita colaboração com a tecnologia de resposta à demanda, interagindo com as redes inteligentes. Essa interação fornece informações de preços em tempo real, que auxiliam os gerentes de edifícios a executar políticas específicas para reduzir o uso de energia durante os períodos de pico e, assim, reduzir custos e levar a um melhor uso de energia. Também permite que as concessionárias gerenciem a demanda e o fornecimento de maneira equilibrada e eficaz, o que é bom para o funcionamento e operação de toda a rede.

A tecnologia de resposta à demanda pode se vincular à rede inteligente para negociação mútua entre fornecedores de demanda e precificação dinâmica de serviços públicos. Isso significaria que os consumidores de energia das edificações monitorariam ativamente o lado da rede, condições de fornecimento de energia e preços, e desligaria algumas cargas para reduzir parte do consumo de energia para evitar o uso caro de energia durante os horários de pico, ou, acionar seus próprios geradores de energia para atender às demandas reais.

Em vários países desenvolvidos como o EUA, as concessionárias de energia oferecem tarifas diferenciadas se o usuário tanto industrial como residencial permitir que em determinadas condições, a concessionária desligue remotamente algumas de suas cargas. No caso residencial, o uso de IoT nestes equipamentos é comum.

A gestão da demanda agrega mais um vetor de redução do custo à gestão para economia de energia que busca melhorar a eficiência energética nas edificações.

3.2 Gestão de edificações conectadas e distritos inteligentes

Os itens anteriores elucidaram a aplicação de tecnologias em edificações, nas diversas fases do seu ciclo de vida, e como podem auxiliar na melhoria da eficiência energética, bem como na gestão de outros recursos. Todavia, quando as edificações são analisadas em conjunto, percebe-se uma nova camada de possibilidades de otimização e compartilhamento, a partir da adoção de tecnologias específicas e/ou da integração entre elas, bem como na possibilidade de gestão compartilhada de ativos, auxiliada por artefatos digitais [11; 101].

Sendo assim, é importante verificar possibilidades para que as edificações possam operar em conjunto, quais as restrições e condições mais adequadas para auferir maiores benefícios ao distrito. Por restrições, entende-se a limitação ao compartilhamento de instalações entre edifícios (por exemplo, em muitas cidades existe a

proibição de compartilhamento de instalações entre edificações sob ou sobre vias públicas), setores das cidades cujos Planos Diretores não permitem usos diversos, disponibilidade ou não de infraestrutura e serviços como provimento de gás, água, esgoto, eletricidade, redes estruturadas de telecomunicações (telefone, cabo, fibra ótica, sinais de telefonia celular e 4G/5G), etc. Por condições mais adequadas, entende-se a possibilidade de ocupação com usos variados, de modo que as necessidades sejam heterogêneas e, conseqüentemente, o padrão de consumo de cada ativo não seja concentrado (entre as unidades), condições climáticas favoráveis para à instalação de geração distribuída com energias renováveis, disponibilidade local de sistemas de armazenamento de energia elétrica, espaço para a criação de reservatórios específicos para as diferentes categorias de água, etc.

Há, no entanto, diversas possíveis abordagens para definir um distrito inteligente, dependendo muito de quem é o indutor da iniciativa. Quando o indutor é o poder público (prefeituras, por exemplo), em geral áreas maiores, como pequenos bairros podem ser abarcadas e os sistemas compartilhados são geridos por empresas incubadas e prestadores de serviços específicos. Nesses casos, há mais flexibilidade em relação à legislação, zoneamento e distribuição de infraestrutura, bem como o escopo de atuação é ampliado para questões urbanísticas mais gerais, contemplando mobilidade inteligente, sistemas de iluminação pública, equipamentos urbanos, etc.

Nesse contexto, cada edificação pode permanecer ligada às redes das concessionárias de serviços de infraestrutura e às empresas prestadoras dos serviços adicionais com medição inteligente para cada ativo e com regras e critérios específicos para o seu compartilhamento com o entorno e as concessionárias.

O balanço dos ativos do distrito pode ou não ser levado em consideração no processo de otimização da gestão. Para considerá-lo (e com isso aumentar os benefícios desta estratégia) é necessário adotar uma estrutura fractal de medição, em que um medidor inteligente de grande capacidade é instalado na entrada do distrito, outros são instalados para atender a conjuntos mais restritos de edificações, cada edificação adota medidores próprios e cada unidade da edificação é também medida (eventualmente, dependendo da tipologia de edificação, a estratégia de submedição e controle, como aplicativos e controles inteligentes, tomadas inteligentes e *Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede*, ainda pode ser adotada no contexto das unidades), o que é fundamental para o rateio contratual (proporcional) e a composição de custos e benefícios entre os usuários.

Com uma estrutura hierarquicamente definida, busca-se o balanço mais próximo a zero dos ativos, de forma autônoma a partir de modelos de automação e contratos inteligentes, em tempo real, da menor instância até a

maior. Ou seja, primeiro a unidade busca manter balanço neutro, compensando somente o necessário com a instância imediatamente superior, para em seguida balancear as necessidades e ofertas de cada unidade e suas áreas e infraestrutura comum [16], só então trocando excedentes e demandas com o subconjunto de edificações que integra (um quarteirão, por exemplo). O conjunto de edificações busca então o balanço neutro entre os edifícios que o integram, passando então às trocas entre conjuntos; o distrito persegue o balanço entre os ativos dos conjuntos e sua infraestrutura comum (geração distribuída, iluminação pública, sistemas integrados de transporte, sistemas de cogeração qualificada, bombas de calor, etc.); e só então o distrito consome ou libera seus excedentes para as concessionárias, levando em consideração questões relacionadas à tarifação dinâmica e programas de resposta da demanda. Esse tipo de abordagem favorece uma maior autonomia a cada uma das esferas de compartilhamento e permite que a demanda por serviços externos seja naturalmente mais baixa. Ademais permite às concessionárias a comunicação ativa com o distrito, facultando o deslocamento de carga sem perda de funcionalidades e aliviando os horários de ponta.

Outros possíveis indutores compreendem a esfera de gestão de grandes condomínios com estrutura urbana própria, em que uma lógica similar à anteriormente detalhada se repete; e, em menor escala, gestores de edifícios situados em um mesmo quarteirão, respeitando a lógica fractal das instâncias envolvidas.

Embora o foco principal deste item seja o tratamento dado à gestão da demanda e às soluções tecnológicas que podem e, portanto, à operação do distrito, é importante considerar que os meios para que tal gestão seja realizada devem ser previstos em projetos específicos de integração, bem como o acompanhamento criterioso de reformas ou novas construções no conjunto, de modo que não afetem negativamente a sua operação. Também é importante prever a infraestrutura para ativos que provejam resiliência ao conjunto a título de serviços compartilhados [17], como sistemas de geração de energias renováveis, aquecimento solar térmico, sistemas compartilhados de fornecimento de água quente, tanques de termoacumulação, sistemas de fornecimento de água gelada e/ou fluidos refrigerantes (para condicionamento de ar), sistemas de captação tratamento e armazenamento de águas de chuva e ou águas residuais, etc. Para tanto, as classes de soluções relacionadas à simulação, como Modelagem Energética Urbana, Fluidodinâmica Computacional, Simulação de iluminação natural e artificial, Softwares para avaliação de ciclo de vida e sistemas de gestão de portfólio energético são essenciais.

Para a fase de operação, em si a gestão da informação é imprescindível, assim como os protocolos de automação e tecnologias associadas, o que faz com que as tecnologias de provimento transversal de infraestrutura de TI, como a

computação em nuvem; de integração, como BIM e sistemas de gestão de portfólio energético; as de registro e automação de transações, como *Blockchain*, seus contratos inteligentes, inteligência artificial e os *hardwares* associados (sensores, atuadores e interruptores inteligentes); as que suportam a resposta da demanda [11], incrementadas por ferramentas de informação ao usuário [163] e gamificação, como tomadas inteligentes e carregadores (bidirecionais) de veículos elétricos (que podem funcionar como baterias ou *no-breaks* para auxiliar no deslocamento de carga), são essenciais. A seguir, apresentam-se as principais soluções e estratégias digitais que influenciam na gestão de edifícios conectados e distritos inteligentes.

Modelagem da Informação da Construção (BIM) [41; 58; 94; 153; 164 – 167]

A tecnologia BIM tem o potencial de ser aplicada a distritos (e até a cidades inteiras, passando nesse caso a ser denominada Modelagem da Informação das Cidades ou *City Information Modelling – CIM*), na medida em que houver instalações compartilhadas e equipamentos de uso comunitário, criando com isso camadas adicionais de informação, cujos responsáveis podem ser diferentes daqueles que respondem pelos modelos BIM de cada edificação, desde que compartilhem o mesmo CDE, de modo que permaneçam comuns a todas as edificações do Distrito. Nesse contexto, descreve detalhadamente sistemas comunitários de infraestrutura, tais como: iluminação distrital (análoga à pública) e sinalização; sistemas de informação e comunicação; sistemas de armazenamento e tratamento de águas; sistemas de tratamento de esgotos; estações de processamento de resíduos sólidos; sistemas de geração de energia; sistemas centralizados de aquecimento e resfriamento de água, bem como suas linhas de distribuição; salas e sistemas de gerenciamento e controle; entre outros. A eficiência energética se dá também de forma análoga à descrita para as edificações.

Modelagem Energética Urbana (UBEM) [63; 115; 168]

Quando realizada a Modelagem Energética da Edificação em uma escala urbana ou distrital, frequentemente se utiliza o termo Modelagem Energética Urbana (UBEM). Tal método permite o estudo do comportamento térmico da envoltória das edificações de forma a mensurar o impacto de todo o distrito nas ilhas de calor urbanas. Tal simulação tem se tornado cada vez mais utilizada no contexto da mitigação das mudanças climáticas e no aumento do conforto térmico na escala urbana. Também é possível simular um conjunto de edificações localizadas no distrito, de forma a minimizar o seu impacto no consumo de energia de acordo com diretrizes legais.

Fluidodinâmica computacional (CFD) [26-29; 33; 34; 36-38;169- 171]

Considerando as mudanças climáticas e a rápida tendência à urbanização, a fluidodinâmica computacional tem ganhado importância na modelagem da ventilação natural com interesse no entorno das edificações, visando analisar a interferência das disposições dos edifícios e os efeitos da verticalização no escoamento do ar em malhas urbanas, nos ambientes internos e na demanda de energia. O CFD tem sido utilizado, sobretudo, para investigações em relação à formação de áreas de estagnação (sombras de vento), identificação de “ilhas de calor” ou prognósticos de temperaturas urbanas, otimização geométrica de edifícios, zonas de recirculação de ar, turbulências, aceleração ou redução da velocidade do vento, atrasos na transferência do calor das superfícies para o ar, dentre outras possibilidades.

Simulação de iluminação natural [55; 172-175]

Entre os fatores que podem prejudicar o desempenho de sistemas de iluminação e causar desconforto por ofuscamento ao usuário estão os referentes ao entorno edificado tais como verticalização, geometria e refletância das superfícies exteriores (pisos, fachadas e coberturas), em especial das superfícies envidraçadas. A simulação computacional fornece diretrizes para melhorar a distribuição das intensidades luminosas dentro dos ambientes porque viabiliza estudos mais aprofundados sobre a disponibilidade e qualidade da luz natural recebida por uma edificação, não somente pela sua orientação face à trajetória solar, mas também em função da ocupação do solo e morfologia urbana circundante.

Os programas de modelagem urbana auxiliam, ainda, na redução do consumo energético e no alcance do conforto ambiental dos diferentes tipos de usuários ao considerar nas simulações da iluminação outras questões como a necessidade de, nos climas quentes, proteger os pedestres da radiação solar (vegetação), mas sem interferir no potencial de geração fotovoltaica dos telhados (auto sombreamento entre os edifícios, por exemplo) e na entrada da iluminação natural nos edifícios. Esta dinâmica se opõe aos processos convencionais de projeto, onde muitas das decisões são baseadas em investigações e pressupostos derivados da experiência profissional ou indicações do fornecedor, e não relacionados a análises de desempenho.

Sistemas de Gestão de Portfólio Energético [44; 70; 71; 176]

Programas de simulação e gerenciamento de portfólio energético são aplicáveis e úteis às instituições que possuem diversos ativos consumidores ou geradores de energia e outros recursos e podem ser encarados de diferentes maneiras, dependendo da instância de agrupamento em que são gerenciados. Prefeituras ou grandes corporações podem utilizar a tecnologia para gerir o balanço energético e de outros recursos dos edifícios, bem como outros equipamentos de uso comum, como ativos de geração distribuída renovável, estações de tratamento de água, esgoto e resíduos, redes de transportes elétricos, iluminação pública e sinalização, etc., que compõem seu portfólio. Edificações conectadas em um mesmo quarteirão podem utilizar a ferramenta para gerir seu balanço conjunto e cada edificação o balanço entre as unidades que a compõem. As análises são úteis para identificar variações não esperadas, indicar manutenções, sugerir medidas de melhoria ou intervenções de maior porte visando à eficiência energética e na gestão dos demais recursos.

Softwares para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) [61; 62]

A influência da ACV no distrito se inicia pela escolha da sua localização, sendo preferíveis as que favorecem um estilo de vida de baixo carbono, com grande oferta de transportes públicos ou com priorização de veículos elétricos. Destaca-se o potencial de funcionamento integrado tanto na etapa de construção, reduzindo os impactos ambientais de transporte de materiais, equipamentos e do canteiro de obras, quanto também na reforma e na demolição. Já na operação o distrito pode se beneficiar principalmente na otimização da geração e demanda de energia renováveis por meio de medidores bidirecionais, que em alguns casos pode minimizar ou eliminar a necessidade de baterias.

Blockchain [20; 177]

Em distritos, de forma similar ao reportado na fase de operação, a principal aplicação do *Blockchain* se dá ao nível do despacho de energia produzida e consumida pelas edificações que o integram, facilitando o balanceamento interno antes da troca com a rede de abastecimento e, portanto, aumentando a eficiência do sistema e reduzindo eventuais custos pelo uso da infraestrutura das distribuidoras (custo da rede em diferentes modalidades). O controle de despacho também se aplica a outros ativos, com ou sem energia incorporada e com diferentes fungibilidades, tais como: água de chuva para fins não potáveis; água gelada (para sistemas de condicionamento de ar); água quente, etc.

Sensores, atuadores e interruptores inteligentes [33,39, 49, 50, 99]

Os distritos inteligentes devem gerenciar ativamente o consumo de energia e o fluxo de energia entre edifícios, consumidores no espaço público e eventual geração de energia elétrica e de outros insumos energéticos. Os distritos demandam a utilização de centenas de sensores e atuadores que funcionam como parte do hardware que operacionaliza o fluxo de ativos, regido por regramentos específicos em plataformas de *Software*, dotadas de inteligência artificial, capazes de processar big data e registrar transações e despachos via *Blockchain*.

Tomadas inteligentes e carregadores de veículos elétricos [181; 182]

A busca de implementar a filosofia de distritos inteligentes também pode impulsionar a penetração desta tecnologia no conjunto de edificações. Os veículos elétricos podem atuar também como dispositivos de armazenamento de energia demandando uma melhor comunicação, medição e gerenciamento da energia consumida e ofertada em relação às edificações integrantes do distrito. No futuro, o gerenciamento dos eletropostos dos distritos será uma importante ferramenta de gestão da demanda, tanto para o consumo, como para a geração de energia.

Aplicativos de resposta à demanda, conscientização e gamificação [11; 13;46; 113; 114; 183]

Em distritos, a resposta pela demanda pode envolver o balanceamento energético do distrito de forma planejada para reduzir a demanda nos horários de ponta antes da troca com a comercializadora ou concessionária de energia, adotando infraestrutura comum (geração, armazenamento, termoacumulação, etc.) para possibilitar a flexibilização da demanda sem perda de funcionalidades. Para isso, os medidores inteligentes precisam ser programados em conjunto para otimizar o despacho no distrito, o que pode ser incrementado pelo uso de *Blockchain*, além de sensores e atuadores. A prática do aumento da informação relacionada à demanda e ao consumo de energia e o uso de estratégias de gamificação (com benefícios locais financeiros ou não) podem ser muito interessantes para estimular a competição entre as unidades que compõem o distrito, criando a cultura da redução da demanda na ponta.

Computação em nuvem [47; 48; 98; 99; 163]

Em distritos, a computação em nuvem pode funcionar para integrar as informações oriundas das diversas edificações que o compõem, todavia, a infraestrutura para a replicação de sinal é considerável. Espera-se que esta seja uma questão resolvida definitivamente a partir do advento do 5G. Por outro lado, é indispensável para garantir a

escalabilidade de um sistema integrado, sem a necessidade de grandes planejamentos para a constituição de infraestrutura de TI compatível, bastando aumentar gradualmente a capacidade contratada de armazenamento e processamento, conforme mais aplicações digitais forem colocadas em produção.

3.3 Medidores inteligentes e seu papel na gestão de edificações

Com a finalidade de obter maior ganho de eficiência energética nas edificações, os medidores de energia, em especial os de eletricidade, têm um papel determinante para que uma melhor gestão energética da edificação seja realizada. No entanto, existem outras tecnologias de medição inteligente que podem e devem ser utilizadas nas edificações, com o objetivo de se obter maiores ganhos de eficiência energética. Desta forma, as tecnologias utilizadas na gestão de outros recursos, como água e resíduos, por exemplo, também devem ser consideradas, uma vez que há uma relação causal entre o consumo de energia e alguns o uso destes recursos, por exemplo, com um maior consumo de água, haverá um maior consumo de energia elétrica realizado por bombas d'água.

Além disso, as tecnologias de medição inteligente utilizadas para medir os diversos parâmetros das edificações não se restringem aos medidores de energia elétrica. Aliás, uma infraestrutura de medição inteligente deve ser composta por equipamentos que medem grandezas energéticas (medidores inteligentes, inclusive), por sistemas e *Softwares* que armazenam, gerenciam e analisam os dados medidos. Nesta seção, abordam-se as seguintes tecnologias de medição inteligente:

- i. Medidores inteligentes;
- ii. Sistemas de gestão predial (BMS);
- iii. Assistentes virtuais;
- iv. Tomadas inteligentes;
- v. Carregadores de veículos elétricos;
- vi. *Blockchain*;
- vii. Modelagem da Informação da Construção (BIM).

Descrevem-se, a seguir, as referidas tecnologias por fase do ciclo de vida e por tipologia de edificação. Na sequência, apresenta-se uma visão geral sobre o mercado de medidores inteligentes no Brasil. Por fim, discutem-se algumas experiências internacionais na implementação dos sistemas de monitoramento e gestão inteligente (*smart metering*).

3.3.1 Tecnologias de medição inteligente e sua utilização por fase do ciclo de vida e tipologia de edificações

Todas as tecnologias de medição inteligente abordadas nesta seção podem ser utilizadas na fase de operação das edificações. Dentre estas, somente duas - *Blockchain* e Modelagem da Informação da Construção (BIM) - permitem que sejam realizadas medições de grandezas em outras fases do ciclo de vida, além da operação. Vale ressaltar que, embora o foco desta seção sejam as tecnologias de medição inteligente, discutem-se em conjunto os modelos de negócios que tais tecnologias podem viabilizar, ou seja, os modelos de negócios *Energy-as-a-Service* (EaaS), centrados no consumidor, que surgiram para compartilhar e monetizar o valor criado pelo aumento da digitalização e descentralização do sistema de energia [186; 187].

Medidores inteligentes

Não existe uma definição formal para medidores inteligentes. Esses podem ser considerados como medidores eletrônicos que têm funcionalidades mais avançadas [177], especialmente relacionadas à comunicação de duas vias. No Brasil, o INMETRO classifica os medidores de energia em dois tipos: eletromecânicos e eletrônicos [177]. Portanto, todos os medidores inteligentes são medidores eletrônicos, mas nem todos os medidores eletrônicos são medidores inteligentes, estes últimos utilizam uma infraestrutura de comunicação [177; 188].

O medidor inteligente deve ser capaz de medir e armazenar dados em intervalos específicos, bem como atuar na interface entre fornecedores de energia e consumidores, por meio de uma comunicação bidirecional. Esta comunicação se torna factível em função da implementação de dispositivos do tipo AMM (*Automated Meter Management*). As versões mais simplificadas de medidores eletrônicos, AMR (*Automated Meter Reading*) oferecem simples comunicação unidirecional, a partir dos clientes para as concessionárias. Entretanto, um conceito mais abrangente é o da AMI (*Advanced Metering Infrastructure*), que utiliza os medidores inteligentes do tipo AMM inseridos e uma estrutura de comunicação, sendo caracterizada como o sistema de medição de uma rede elétrica inteligente [189]. Dentre as tecnologias de comunicação mais adotadas para integrar o medidor a esta rede, destacam-se ZigBee, *Power Line Communication* (PLC) e rede *Mesh*.

Os medidores inteligentes devem ter memória para armazenamento de informações do consumidor, além de uma interface para que possa ocorrer troca de informações entre o consumidor e a distribuidora de energia, o gateway. A segurança e controle da comunicação via este gateway é fundamental para a garantia da integridade e privacidade dos dados trocados. Outra forma de se estabelecer uma

comunicação de segurança é o uso da VPN (*Virtual Private Network*), pois esta rede pode garantir um caminho seguro de comunicação, além de criptografar os dados transmitidos/recebidos [106; 190].

Em sua versão mínima, o medidor pode fornecer os dados de consumo das últimas horas, dias, semanas, meses ou ano. Além disso, por meio de aplicativos ou sistemas das empresas de energia, é possível apresentar os dados por unidade consumidora, transmiti-los à distribuidora de energia para fins de faturamento ou disponibilizá-los a um terceiro para serviços de valor agregado que, muitas vezes, ainda estão por ser definidos [106].

As grandezas que alguns medidores mais modernos são capazes de medir são: energia ativa e reativa; potência ativa e reativa; indicadores de qualidade (registros da frequência e da duração de interrupções e informações de tensão e corrente). Além disso, esses equipamentos devem ter uma interface amigável com o consumidor, permitindo o acompanhamento e gestão de seu consumo, bem como das tarifas relativas às diversas grandezas medidas. O monitoramento e o gerenciamento podem utilizar outras tecnologias, como sistemas de gestão predial (BMS) e assistentes virtuais.

Alguns medidores inteligentes são capazes de habilitar preços em tempo real, vinculando sinais de preço de eletricidade diretamente a aparelhos “inteligentes”. Assim, os consumidores ficam munidos de informações sobre o seu padrão de consumo, o que possibilita o gerenciamento do seu consumo. Todavia, funcionalidades adicionais vão além de medir o consumo de energia dos usuários finais, ou seja, permitem que sejam usados em aplicativos de gerenciamento do lado da demanda. Dependendo da aplicação e dos métodos de pagamento, existe uma variedade de medidores que podem ser utilizados.

O medidor inteligente pode ser utilizado em qualquer tipologia de edificação em substituição ao medidor eletromecânico, que ainda vem sendo muito adotado no mercado brasileiro. Basicamente, este medidor será utilizado na fase de operação da edificação, podendo melhorar a interface entre usuário e seus equipamentos. Além disso, o medidor inteligente deve ser capaz de medir nas duas direções, medindo não somente a energia consumida pela unidade consumidora, mas também a quantidade de energia injetada na rede elétrica. Esta funcionalidade permite que o consumidor tenha sua própria geração, conhecida no mercado de energia elétrica como geração distribuída [136]. Como isso, o consumidor não somente consome energia da distribuidora, como também pode instalar um sistema de geração própria em sua edificação (solar fotovoltaica, por exemplo), sendo denominado, desta forma, de prossumidor.

O processo de digitalização não está acontecendo apenas no mercado de energia elétrica, mas também naqueles setores que comercializam outras utilidades, como água e gás, por exemplo. No caso das empresas de abastecimento de água, um avanço natural para que haja a maior conservação deste importante recurso natural é a utilização de hidrômetros digitais, que podem ser instalados nas edificações.

Da mesma forma que os medidores inteligentes de eletricidade, as tecnologias de medidores digitais empregados em outras utilidades podem ser utilizadas em qualquer tipologia de edificação na fase de operação. Isso poderá viabilizar a utilização de redes de comunicação compartilhadas entre as diversas empresas de utilidades (eletricidade, gás, água etc.) [191].

Sistemas de gestão predial (BMS)

Os sistemas de gerenciamento e controle das edificações são sistemas de gestão inteligente, responsáveis por controlar e monitorar equipamentos/sistemas mecânicos e elétricos de uma edificação [58], tais como AVAC, iluminação, sistemas de geração de energia, sistemas contra incêndio, sistemas de segurança, dentre outros. Estes sistemas permitem integrar diversas tecnologias de medição inteligente, com vistas a reduzir o consumo de energia da edificação, melhorando o conforto e aumentando a produtividade [192; 193].

Os sistemas de gerenciamento e controle podem ser usados na fase de operação em qualquer tipologia de edificação, com o objetivo de melhorar a gestão dos seus recursos. Além disso, estes sistemas podem e devem ser integrados às outras tecnologias de medição inteligente que serão descritas nesta seção, visando melhorar ainda mais a gestão da operação das edificações. Vale uma ressalva para a tipologia de habitações de interesse social, pois há uma restrição do ponto de vista econômico e não do uso tecnologia *per se*.

Assistentes virtuais

O assistente virtual é um *Software* que tem habilidade de executar algumas tarefas ou serviços para um indivíduo com base em comando de voz [194]. Esses Softwares têm a capacidade de fazer a interpretação da fala humana e responder por meio de vozes sintetizadas. Com isso, por meio do comando de voz, os usuários podem fazer perguntas a seus assistentes virtuais, controlar dispositivos de automação residencial e gerenciar outras tarefas básicas [194].

O uso dos assistentes virtuais nas edificações se dá na fase de operação, sendo mais utilizados em edifícios residenciais para controle de alguns dispositivos como tomadas inteligentes, que podem, inclusive, medir o consumo de energia elétrica. Essa funcionalidade permite que haja uma melhor gestão da energia pelo usuário na sua residência.

Embora o maior uso desta tecnologia se dê nas edificações residenciais, nada impede o uso destes dispositivos em edifícios públicos e comerciais. Nas habitações de interesse social, espera-se uma baixa penetração desta tecnologia, considerando as outras prioridades de seus usuários.

Tomadas inteligentes

As tomadas inteligentes são dispositivos elétricos que permitem que os aparelhos comuns sejam conectados à internet, tornando-se tornando “inteligentes”. Também possibilitam que as pessoas monitorem o uso de energia e, por sua vez, possam gerenciar a maneira como utilizam este recurso [196]. Este monitoramento é feito via *Software*, inclusive por assistentes virtuais, que podem ser utilizados em *smartphones* ou computadores.

O uso de tais tecnologias nas edificações se dá na fase operação, sendo mais utilizados em edifícios residenciais. Apesar do maior uso desta tecnologia ser em residências, nada impede o seu uso em edificações públicas e comerciais. Também para esta tecnologia, no que tange às habitações de interesse social, há de se esperar uma baixa penetração, pois seus usuários têm outras prioridades.

Carregadores de Veículos elétricos

A EV Charger é uma estação de carregamento de veículo elétrico, capaz de fornecer energia elétrica para carregar as baterias dos veículos elétricos *plug-in* (incluindo veículos híbridos, caminhões, ônibus e outros) [197]. Uma vez que as baterias só podem ser carregadas com corrente contínua (CC), a maioria dos veículos elétricos possui um conversor CA-CC (Corrente Alternada – Corrente Contínua) integrado, possibilitando que esses veículos sejam conectados a uma tomada elétrica CA doméstica comum, por exemplo. Como isso, os carregadores de veículos elétricos podem estar presentes em estações de carregamentos públicas ou privadas em diversos tipos de edificações, inclusive as residenciais. Muitas edificações comerciais e de serviços, assim como públicos, têm carregadores de veículos elétricos instalados em seus estacionamentos, sendo estes dispositivos usados na fase de operação das edificações.

Além disso, há vários modelos de negócios que permitem a integração do veículo elétrico à edificação, graças aos carregadores de veículos elétricos. A legislação brasileira permite, apenas, o modelo de negócio G2V (*grid to vehicle*), no qual o veículo é conectado à rede elétrica e consome a energia, sendo proibido o carro elétrico fornecer energia para a rede. Neste caso, o sentido da medição de energia é unidirecional.

Em alguns países, no entanto, é permitido, além de G2V, o V2G (*Vehicle to Grid*). Neste caso, a bateria do veículo elétrico pode ser um backup para o sistema elétrico,

possibilitando a injeção da energia na rede elétrica em horários de maior demanda pelo sistema. Em alguns países, não é permitida a injeção da energia diretamente na rede, mas sim nas edificações (V2B ou *Vehicle to Building*). Em ambos os modelos de negócios, o sentido da medição de energia deve ser bidirecional [197], para que o modo de injeção de energia elétrica no sistema possa estar habilitado.

Com um ambiente regulatório que permita o V2G ou o V2B, os veículos elétricos podem ganhar maior espaço no mercado automotivo no Brasil. Além disso, uma política neste sentido traria flexibilidade para o sistema elétrico potência, tornando-o muito mais eficiente [197].

Blockchain

A tecnologia *Blockchain* pode ser usada em contratos inteligentes, o que faz com que esta tecnologia possa ser utilizada, além da operação da edificação, nas fases de construção e de reforma. Isso permite o rastreamento de vários processos nestas fases do ciclo de vida, como controle de estoque de materiais, do efetivo de mão de obra, das tecnologias disponíveis e de condições ambientais, que poderiam impactar o avanço físico da obra. Assim, junto com outras tecnologias como IoT e *Big Data*, *Blockchain* e contratos inteligentes criam um ambiente de integração que pode dinamizar a cadeia de suprimentos de construção e de licitação (para compra, aquisição e provisionamento) [198]. Esta tecnologia pode ser utilizada em qualquer uma das cinco tipologias de edificações analisadas e, como colocado anteriormente, nas fases de construção, operação e reforma.

Além disso, na fase de operação da edificação, *Blockchain* pode revolucionar o modo de consumir energia, uma vez que possibilita estabelecer uma hierarquia de prioridades em relação às fontes de geração em sua origem. Isso permite que processos de certificação de energias renováveis sejam agilizados e automatizados, pois há um maior grau de rastreabilidade de onde vem a energia consumida pela edificação, se esta é fornecida por uma fonte 100% “verde”, por exemplo. Esses acordos desempenham um papel fundamental nos dias atuais, pois promovem o crescimento das energias renováveis ao estimular a compra desse tipo de energia por grandes corporações [199].

Por meio dos contratos inteligentes, o emprego da tecnologia *Blockchain* também garante a transparência e segurança das transações realizadas, pois os dados ficam permanentemente registrados numa plataforma, permitindo a todas as partes auditarem as informações definidas pelo contrato.

Modelagem da Informação da Construção (BIM)

O BIM pode ser utilizado em todas as tipologias de edificações e em todas as fases de ciclo de vida. Entretanto, em residências unifamiliares e habitações de interesse social (HIS), a relação custo-benefício da adoção do BIM em todas as fases do ciclo de vida deve ser avaliada. Talvez nas HIS, se esta tecnologia for utilizada em loteamentos, o uso desta possa fazer sentido do ponto de vista econômico para as construtoras.

Na fase de projeto, com emprego do BIM podem ser medidos os parâmetros de projeto (custos, por exemplo), as características do local onde projeto será construído (e.g., ambientais e de zoneamento) e os atributos relacionados à forma da edificação (e.g., arquitetura e estrutura da edificação), possibilitando, assim, fazer uma estimativa das quantidades de materiais e dos preços dos equipamentos dos sistemas [5]. Já na fase de construção, todo o processo de aquisição de serviços e bens junto a fornecedores, bem como a montagem de equipamentos, pode ser medido e monitorado [5]. Na fase de operação, o comissionamento (e.g., testes de equipamentos), a ocupação e a gestão da manutenção podem ter indicadores próprios que podem ser medidos e monitorados [5; 7]. Na fase de reforma, o projetista pode, com o auxílio do BIM, avaliar o impacto do emprego de diferentes medidas de eficiência energética no consumo de energia e o custo final, utilizando o processo de Medição e Verificação (M&V) do desempenho [9]. Por fim, na fase final do ciclo de vida da edificação, todo inventário das atividades de planejamento, orçamentação, controle de obra, comissionamento e operação pode ser utilizado para auxiliar na definição do destino mais adequado dos resíduos gerados na fase de demolição da edificação [7].

3.3.2 Mercado nacional de medidores inteligentes

Os medidores inteligentes podem ser utilizados em qualquer tipologia de edificação e basicamente na sua fase de operação. O potencial para economia de energia em edificações existentes é muitas vezes citado como um dos grandes benefícios que este equipamento pode trazer [177]. Os benefícios energéticos ocasionados pela medição inteligente variam de acordo com a tipologia do edifício, estrutura tarifária e os outros sistemas e infraestrutura associados. Além disso, os motivadores para a instalação da medição inteligente nas várias tipologias de edificações são diferentes.

Em relação às aplicações por tipologia, os medidores eletrônicos foram inicialmente instalados no Brasil nas edificações unifamiliares, em especial as de interesse social, com a motivação da redução de perdas não técnicas ou furto de energia. Esta primeira iniciativa foi realizada pela distribuidora Ampla (hoje, Enel Distribuição Rio).

A empresa, para obter resultados significativos e duradouros de redução destas perdas, decidiu adotar uma solução estrutural baseada na implantação de uma nova topologia de rede elétrica, ou seja, uma “rede blindada” que a empresa denominou de Rede DAT (Distribuição Aérea Transversal), cujo medidor utilizado era eletrônico [132]. Desde então, a utilização de medidores eletrônicos tornou-se uma realidade em muitas áreas de concessão da distribuição de energia no país.

O furto de energia criou o primeiro e, talvez, o mais importante mercado da medição inteligente no Brasil. As concessionárias de distribuição de energia elétrica devem investir em ferramentas que possam reduzir as perdas não técnicas em sua área de concessão, pois a ANEEL estabelece níveis máximos destas perdas (regime de metas), que devem ser reconhecidas na tarifa de energia elétrica [201]. Vale ressaltar a importância deste instrumento regulatório para o aumento da eficiência energética, uma vez que os consumidores que furto energia não se preocupam com a sua conservação, quando comparados com aqueles que pagam sua conta de eletricidade em dia [200].

Outra iniciativa importante no mercado de distribuição de energia elétrica, visando à implantação das redes elétricas inteligentes e, conseqüentemente, à medição inteligente no Brasil, foram realizados projetos pilotos de implantação dessas redes [189]. Os projetos piloto utilizaram recursos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Dos projetos registrados no banco de informações desta Agência, 43 projetos faziam referência ao desenvolvimento em *redes inteligentes*, redes inteligentes e cibersegurança para redes, medição inteligente, comunicação ou inteligência de processamento [106]. Esses projetos foram iniciados em 2010 e concluídos em 2016, totalizando um investimento de cerca de R\$ 276 milhões, segundo sua previsão orçamentária [106]. Alguns dos projetos pilotos tinham foco no consumidor e o propósito maior era estudar as diversas condições da operação de uma rede com digitalização mínima nos medidores.

Desde 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL [136], o consumidor ficou habilitado a gerar sua própria energia elétrica, inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade (prossumidor). Assim, o consumidor de qualquer classe de consumo, dentre elas residencial, poder público e comércio e serviços, pode instalar a mini e microgeração distribuída. Esta resolução estabelece também o sistema de compensação de energia que é um sistema no qual a energia ativa injetada por uma unidade consumidora é cedida à distribuidora local, gerando créditos para o consumidor. Posteriormente, esta energia é compensada, quando o consumidor precisar deste montante de energia [136].

Para viabilizar tecnicamente este sistema de compensação, torna-se necessário que a distribuidora instale na unidade consumidora um medidor bidirecional, ou dois medidores unidirecionais. Assim, é possível medir a energia que o consumidor cede à distribuidora e dela consome. Há uma tendência do uso de medidores eletrônicos ou inteligentes nos sistemas de compensação, mas não obrigatoriamente estes medidores são utilizados em todas as distribuidoras do país. Como o mercado da geração distribuída tem crescido fortemente desde 2012, graças à fonte solar fotovoltaica, há uma expectativa que medidores inteligentes para serem utilizados em sistemas de compensação de energia sejam cada vez mais empregados.

As redes elétricas inteligentes trazem diversos benefícios para o controle e operação do sistema elétrico brasileiro, além de trazer a possibilidade da criação de novos produtos e funcionalidades que podem abrir um leque de novos serviços que exigirão uma postura mais ativa parte do consumidor, e um melhor entendimento dos seus hábitos de consumo e um maior poder de análise para tomadas de decisões. Estes novos serviços são viabilizados com a instalação de medidores inteligentes nas edificações, permitindo, ao consumidor o gerenciamento em tempo real do seu consumo de energia elétrica, o acionamento e desligamento remoto de cargas da sua residência e, talvez, o mais relevante indutor dessas ações, a possibilidade de escolher entre diferentes tarifas ou preços de energia ao longo do dia [201]. Assim, tem-se o empoderamento do consumidor, na medida em que ele se torna não mais um agente passivo no processo de consumo de energia, mas

um agente completamente ativo, uma vez que aumenta significativamente seu poder de escolha dos produtos que podem ser ofertados pelos provedores de energia elétrica [201].

Uma das primeiras iniciativas neste sentido foi o estabelecimento de uma tarifa horária para os consumidores de BT, denominada tarifa branca, que é regulamentada pela REN nº 733/2016. Esta tarifa tem valores diferenciados na ponta e fora ponta, além de um valor intermediário. Na Figura 3, apresenta-se a estrutura tarifária para os consumidores de baixa tensão no Brasil, evidenciando-se os postos tarifários ponta, fora ponta e intermediário. Notam-se ainda as diferenças destas tarifas em dias úteis (gráfico da esquerda da figura) e sábados, domingos e feriados (gráfico da direita).

Ao se oferecer essa nova estrutura tarifária, o objetivo da ANEEL foi incentivar o uso mais eficiente do sistema elétrico, tendo a sinalização de preços como mecanismo indutor da modulação de carga. Em outras palavras, cobra-se mais caro para o uso da energia em horários nos quais esta é mais demandada, ou seja, nos horários intermediário e de ponta [201].

Vale destacar que a adoção da tarifa branca é de caráter opcional e, por isso, não foram instalados no Brasil uma quantidade significativa de medidores inteligentes. Além disso, percebe-se que não há disseminação de informação desta política pelos órgãos competentes, o que se traduz na sua baixa efetividade até o momento.

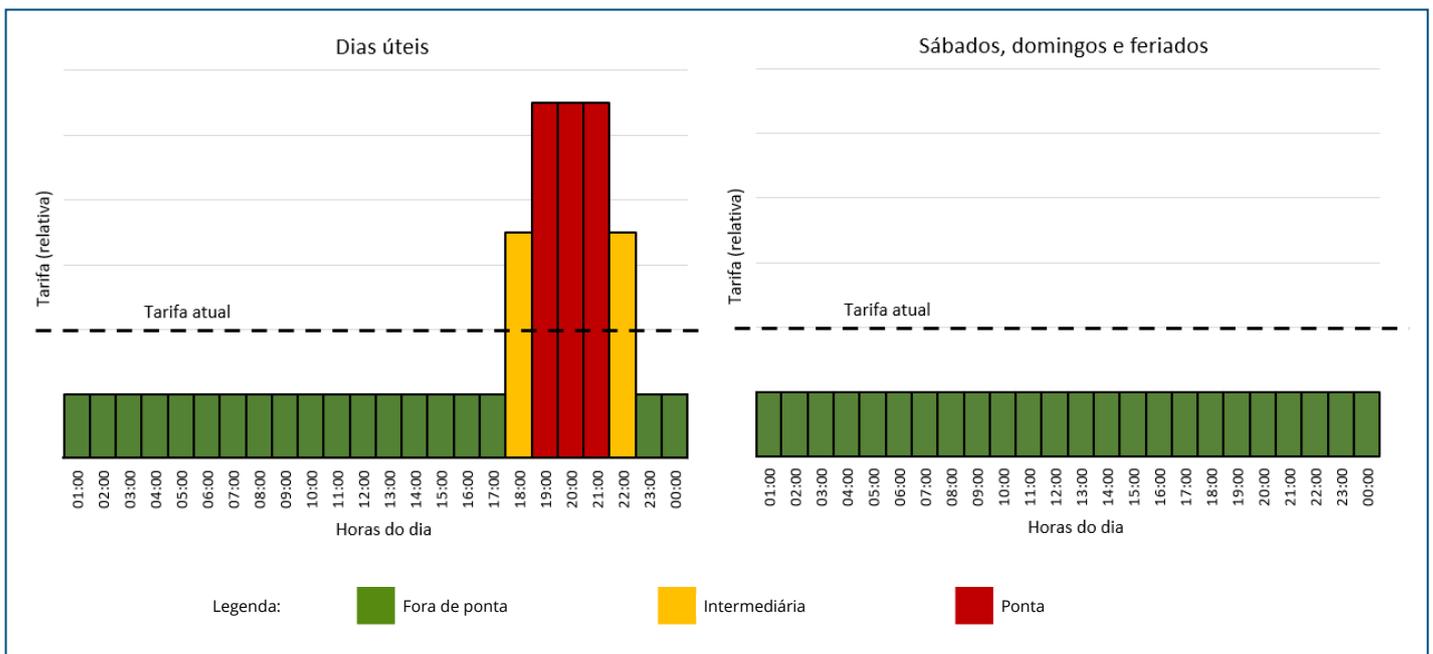


Figura 3 – Estrutura tarifária para consumidores de baixa tensão no Brasil. Fonte: Elaboração própria.

Todavia, isto traz a oportunidade de aumentar a abrangência no mercado de medição inteligente no país, caso uma política de disseminação de informação sobre a tarifa branca seja adotada.

Além desta política, estão sendo discutidas no âmbito de audiências e consultas públicas duas políticas que podem alavancar o mercado dos medidores inteligentes no Brasil: a modalidade de pré-pagamento de energia e a tarifa binômia [142; 143]. Além disso, com o crescimento do mercado de veículos elétricos no país, vislumbra-se mais uma oportunidade para o crescimento da medição inteligente nas edificações.

O recente estudo “Uso de novas tecnologias digitais para medição de consumo de energia e níveis de eficiência energética no Brasil” [106], lançado em 2021, abordou este assunto destacando que a abertura do mercado de energia elétrica, que vem sendo discutida desde que foi aberta a Consulta Pública nº 33 de 2017, pode ampliar o mercado de medidores inteligentes no Brasil. Neste sentido a criação do agregador de energia, agentes que reúnem diversos Recursos Energéticos Distribuídos (RED) e formam plantas virtuais, podem também contribuir para ampliação da medição inteligente no país [106].

Em síntese, o mercado de medidores inteligentes tem um grande potencial de crescimento no país, graças ao arcabouço regulatório vigente, trazendo também a oportunidade de alavancar o mercado de outras tecnologias de medição inteligente abordadas neste item. Em um cenário de adoção destas tecnologias, ganhos de eficiência energética nas edificações podem ser conseguidos, uma vez que, com as informações geradas por um processo de digitalização do setor energia e do segmento de edificações, os consumidores poderão tomar decisões mais racionais quanto ao uso da energia elétrica e também de outros recursos.

3.3.3 Experiências internacionais na implementação dos sistemas de monitoramento e gestão inteligente (*smart metering*)

No final da primeira década deste milênio, as decisões de investimento em redes elétricas inteligentes foram motivadas pelos acordos internacionais para mitigação dos impactos causados pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesta época, estava em vigência o Protocolo de Quioto. Assim, a adoção de fontes renováveis, o desenvolvimento de veículos elétricos e o aumento da eficiência energética eram algumas das medidas que poderiam impactar na redução dos GEE. Além disso, outro motivador foi que alguns países decidiram adotar as redes elétricas inteligentes para modernizar suas redes, que estavam envelhecidas e obsoletas. O Quadro 12 sintetiza os principais motivadores para implantação das redes elétricas inteligentes nos EUA, países europeus, China e Japão.

Quadro 12 – Síntese dos principais motivadores para a implantação das redes inteligentes em diferentes países.

Fonte: [189].

País/Região	Principais motivadores
EUA	Agenda tecnológica para recuperação econômica
	Infraestrutura obsoleta
	Geração distribuída
	Confiabilidade, segurança e eficiência do sistema
	Uso de veículos elétricos e híbridos
Europa	Integração de diversas fontes de energia renováveis
	Infraestrutura envelhecida
	Uso de veículos elétricos
Japão	Diversificação energética (acidentes nucleares)
	Uso de veículos elétricos
	Implantação de “Cidades Inteligentes”
China	Implantação de “Cidades inteligentes” e protagonismo mundial em IoT
	Eficiência energética
	Diversificação energética (fontes renováveis)

Os medidores inteligentes são tecnologias habilitadoras que propiciam a obtenção de maiores economias de energia, uma vez que possibilitam a gestão e operação mais eficazes dos recursos energéticos e mudanças comportamentais dos consumidores [106;203;187]. O processo de difusão e implantação dos medidores inteligentes nos países da União Europeia deu-se basicamente em função da publicação da Diretiva 2009/72/EC [203]. De acordo com esta Diretiva, a implantação dos medidores inteligentes, condicionada a uma análise econômica positiva, deveria atender ao menos 80% dos consumidores dos países membros do bloco até 2020 [190]. Grande parte dos países membros conseguiram alcançar a meta de 80% de medidores instalados até 2020, sendo que alguns atingiram a meta antes de 5 anos (Suécia, Itália, Finlândia e Malta) [204].

Em relação às funcionalidades mínimas dos sistemas de medição, com a publicação da Recomendação 2012/148/EU, foram fixadas as características mínimas dos medidores inteligentes que deveriam estar presentes no mercado dos países do bloco [205]. Todavia, observou-se que 80% dos países membros da UE pretendiam ter todas as dez funcionalidades disponíveis para os seus consumidores de eletricidade e 50% almejavam fazê-lo gratuitamente [204]. Além disso, todos os países membros

que forneceram informações sobre as funcionalidades dos seus sistemas de medidores inteligentes para que esses possam pelo menos fornecer leitura direta aos consumidores, permitir a atualização das leituras com frequência suficiente para utilizar esquemas de conservação de energia, e apoiar sistemas tarifários mais avançados [204]. Além destas funcionalidades, a Recomendação 2012/148/EU sugere que os medidores devam ter a capacidade de fornecer uma comunicação de dados segura e prevenir ou detectar fraudes [205].

Com a introdução das energias renováveis e o aumento do mercado dos medidores inteligentes em alguns países membros da União Europeia (Alemanha, por exemplo), os requisitos para uma operação segura e eficiente das redes elétricas aumentaram [106]. Assim, a cibersegurança se torna um tema de extrema relevância e exige a normatização, com uma padronização de segurança específica para as redes inteligentes [106].

No caso do Reino Unido, há o empenho dos múltiplos atores envolvidos em todo o processo de difundir os medidores inteligentes, inclusive governo. Assim, o governo britânico recomenda um acompanhamento social ativo pautado nos seguintes objetivos [189]:

- i. Desenvolver a confiança dos consumidores em relação aos medidores inteligentes;
- ii. Fazer campanhas para que haja uma maior compreensão do consumidor sobre a operação e as informações, que são disponibilizadas por estes equipamentos;
- iii. Aumentar a disposição dos usuários em utilizar estes equipamentos de tal sorte que possam mudar seu comportamento, a fim de reduzir o consumo energético;
- iv. Auxiliar clientes vulneráveis, de baixa renda e pré-pagos a perceberem os benefícios advindos dos sistemas de medição inteligente sem comprometer os níveis adequados de conforto ou relativos a outras necessidades energéticas.

Nos EUA, a implementação das tecnologias relacionadas às redes elétricas inteligentes ocorreu a partir de 2007 com a promulgação do Ato de Independência e Segurança Energética (*Energy Independence and Security Act*). No caso específico da implementação das redes inteligentes, esta medida objetivou:

- i. Aumentar a digitalização da rede elétrica para que haja maior confiabilidade, segurança e eficiência;
- ii. Otimizar as operações de forma dinâmica;
- iii. Implementar recursos distribuídos;
- iv. Desenvolver mecanismos de resposta à demanda;
- v. Implantar tecnologias “inteligentes” (em tempo real) para operação;
- vi. Melhorar a integração de aparelhos “inteligentes” e dispositivos de consumo;
- vii. Implantar e integrar tecnologias de armazenamento, incluindo veículos elétricos plug-in e híbridos elétricos;
- viii. Fornecer aos consumidores maiores informações e opções de controle do seu consumo;
- ix. Desenvolver padrões de comunicação e interoperabilidade de aparelhos e equipamentos conectados à rede elétrica, incluindo a infraestrutura;
- x. Identificar e reduzir as barreiras irracionais ou desnecessárias à adoção de tecnologias e práticas de redes inteligentes [206].

Seguindo a trajetória de medição inteligente da União Europeia, os EUA instalaram até 2019 em torno de 98 milhões de unidade de medidores inteligentes, cerca de 70% [330] e a previsão é que instalem até o final de 2021, cerca de 115 milhões, o que mostra o compromisso deste país com o Ato de Independência e Segurança Energética [207].

Durante 2018, medidas de resposta à demanda nos Estados Unidos forneceram mais de 785 MW de capacidade flexível, com 2,7 milhões de participantes [209]. Um exemplo de sucesso desta medida foi o da cidade de Baltimore, sendo o maior de seu tipo nos Estados Unidos, com 1,1 milhão de residências inscritas e mais de 70% de participação na mudança de carga no horário de pico. Assim, qualquer cliente que instalar um medidor inteligente é automaticamente inscrito no programa e pode optar por sair. Na sequência, os participantes são notificados um dia antes dos “Dias de Economia de Energia” (normalmente dias quentes de verão) e se conseguirem reduzir o consumo nesses dias, recebem um crédito na conta de US\$ 1,25 por cada quilowatt-hora que economizam em relação ao uso normal.

Vale ressaltar que as experiências internacionais de instalação de medidores inteligentes nas edificações têm permitido que todas as funcionalidades destes equipamentos sejam implementadas em qualquer edificação, sem distinção de tipologia. Isto possibilita uma melhor gestão e operação dos recursos energéticos nestes países. Ainda, fica evidente que a funcionalidade de gerenciamento energético na modalidade pré-pago é aplicável a famílias de maior vulnerabilidade (medida de cunho social). No entanto, há uma preocupação que estas famílias não tenham perda de conforto.

3.4 Tecnologias digitais para certificação de edificações

A certificação ambiental é um método de reconhecida eficácia para melhorar o uso de recursos naturais de um País, fornece ao consumidor informações sobre o desempenho ambiental e energético de determinado produto (edifício) e ajuda a criar uma visão compartilhada sobre o significado prático das temáticas sustentabilidade e eficiência energética. A certificação de edificações é concedida de acordo com o desempenho do edifício perante critérios pré-estabelecidos, organizados por categorias, onde as categorias referentes à energia apresentam peso relevante.

Os avanços das tecnologias de captura e transmissão de imagens e documentos, *Blockchain*, segurança de dados, entre outras, possibilitaram a digitalização de vários processos de certificação e a criação de plataformas digitais com mais segurança e agilidade. O item 3.4.1 aborda de forma genérica as certificações em edificações, as tecnologias atualmente utilizadas e as com potencial e o item 3.4.2 foca na aplicação de tecnologias de inspeção remota, conforme orientações da Norma ABNT NBR ISO 19011:2018 - Diretrizes para auditoria de sistemas de gestão [4].

3.4.1 Tecnologias digitais utilizadas no processo de certificação

Nos últimos 30 anos, foram criadas diversas certificações para edificações que, através de avaliações terceirizadas e imparciais de diversas esferas, verificam aspectos sustentáveis de uma construção. Cada uma concentra-se em enfoques e abordagens diferentes, algumas delas consideram mais relevantes os aspectos de eficiência energética, outras buscam otimizar o consumo dos materiais de construção. Existem as que buscam enfatizar a etapa executiva, enquanto outras a etapa de projeto e, muitas vezes, são mais relevantes em determinadas regiões do mundo.

No Brasil, se destacam a Etiqueta PBE Edifica e o Selo Casa Azul + Caixa, que são de origem nacional, e diversos selos baseados em modelos internacionais e alinhados em sua maioria com o PBE Edifica no que se refere à categoria energia, dentre os quais destacam-se: LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*); EDGE (*Excellence in Design for Greater Efficiencies*); WELL *Building Standard*, de origem americana; BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), de origem inglesa; DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*), de origem alemã, e AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental - *Haute Qualité Environnementale*) de origem francesa [209-217].

Interessante destacar que na Categoria 6 (Inovação) do Selo Azul + Caixa são concedidas pontuações adicionais pela utilização da Modelagem da Informação da Construção (BIM) na gestão integrada do empreendimento, de sistemas eficientes de automação predial e de ferramentas digitais voltadas a práticas de sustentabilidade e que facilitem a gestão colaborativa do empreendimento.

Alinhadas com os esforços para a digitalização do segmento de edificações, as principais certificações ambientais para edificações possuem ou estão desenvolvendo sistemas e plataformas digitais de apoio aos seus processos de avaliação, descritas a seguir:

- Webprescritivo PBE EDIFICA [218] - trata-se de uma ferramenta de avaliação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas pelo Método Prescritivo da INI-C. O objetivo dessa ferramenta não é obter uma etiqueta de conservação de energia, mas sim automatizar os procedimentos de avaliação da edificação conforme o regulamento vigente. Pela web, o usuário fornece os parâmetros de projeto do seu edifício e obtém o nível de classificação da etiqueta parcial para envoltória, iluminação, condicionamento de ar e para a etiqueta geral da edificação. O Webprescritivo ainda está em desenvolvimento, mas uma versão preliminar pode ser acessada para testes;

- ARC SKORU / LEED [219] – o *Green Business Certification Inc.* (GBCI) lançou essa plataforma e integrou os parâmetros da certificação LEED O+M para operação e manutenção predial, apresentando um novo conceito para medir o desempenho operacional dos edifícios no âmbito das diferentes categorias como água, energia, resíduos e qualidade do ar. A plataforma permite que profissionais, gerentes de instalações e demais usuários adicionem dados dos seus edifícios e gerem pontuações, explorando as relações métricas quanto à sua eficiência atual e as reduções possíveis, com base nos edifícios certificados pelo LEED em todo o mundo, seja para atingir o nível de certificação desejado, seja para obter melhores indicadores equiparáveis no mercado (análise de benchmarks);
- LEED ONLINE [220] - o *U.S. Green Building Council* (USGBC) lançou novas ferramentas para a certificação LEED BD+C (novas construções) e LEED ID+C (interiores) no LEED Online, de forma a apoiar a pré-certificação e certificação inicial dos projetos submetidos a essas certificações, consistente em formulários de documentação no formato Web, calculadoras offline baseadas em Excel para a documentação dos créditos mais complexos (equipamentos médicos, resíduos de demolição, emissões evitadas etc.), dentre outras;
- EDGE 3.0 [211] - a certificação EDGE é pioneira no processo de digitalização, já tendo nascido como um sistema totalmente digitalizado e online. Além do tradicional upload eletrônico de documentos, já existente nas demais certificações, na EDGE todos os cálculos de desempenho são feitos através desse sistema, em tempo real. O EDGE 3.0 é, portanto, uma plataforma baseada em nuvem para calcular o custo de projetos de sustentabilidade e eficiência energética em edifícios, que inclui um conjunto sofisticado de dados de custo e climáticos baseados em padrões de consumo e algoritmos para prever os resultados de desempenho. Sendo de uso aberto e gratuito, uma rede global de certificadores e especialistas EDGE credenciados utiliza essa plataforma para simular o desempenho ambiental dos seus projetos/edifícios, sem necessariamente estar em busca do certificado;
- BREEAM In Use v6 [212] – trata-se de uma plataforma online existente desde 2009 e que vem sendo constantemente atualizada com novos recursos digitais, onde avaliadores, gerentes e proprietários de edifícios podem registrar e enviar as evidências das suas instalações (em uso) para certificação. De forma instantânea os usuários simulam as pontuações em relação aos critérios BREEAM e podem comparar seus resultados com outros edifícios certificados da mesma tipologia acessando o benchmarking de sustentabilidade que é disponibilizado. As ferramentas digitais do BREEAM

permitem ainda a interação entre os usuários da plataforma por meio de fóruns e do Wiki BREEAM.

O uso de tecnologias digitais pode alavancar o mercado de certificações por agregar aprimoramentos importantes aos processos como maior agilidade na concessão da certificação com contratos inteligentes, reduzindo os tempos de verificação e maior confiabilidade com a tecnologia *Blockchain*, dando segurança e rastreabilidade a cada transação, bem como o aumento da fluidez da informação e transparência hierarquizada com acesso personalizado de acordo com a esfera de competência de cada parte envolvida.

Os dados ficam permanentemente registrados de forma distribuída, permitindo acesso ao histórico de transações realizadas a todas as partes, seja a título de conferência ou auditoria. Conforme mencionado anteriormente, encontra-se em desenvolvimento no Brasil uma iniciativa pioneira coordenada pelo Procel, denominada Projeto Smart Selo Procel – Aplicações em plataforma *Blockchain* para Certificação de Eficiência Energética, que pretende agregar uma camada de *Blockchain* ao Selo Procel para equipamentos e pode ser estendida para as Edificações. Aplicar-se-á a todas as tipologias de edificações em seus subsistemas considerados na avaliação para o Selo (envoltória, AVAC, iluminação e aquecimento de água), bem como para equipamentos com Selo Procel.

A partir da análise das tecnologias digitais abordadas no Capítulo 2 e na perspectiva do órgão certificador (capaz de proceder com simulações termoenergéticas a pedido do solicitante, por exemplo), reúnem-se no Quadro 13, a seguir, as tecnologias consideradas para aplicação nos principais processos de certificação de edifícios, de acordo com a fase do ciclo de vida.

Apesar de algumas das tecnologias listadas também possuírem potencial para aplicação em processos de certificação de quadras, bairros e distritos, essas não foram

mencionadas aqui por estarem fora do escopo desta seção 3.4.

No âmbito das certificações de origem nacional, a fase de operação pode ser aqui entendida como a certificação da edificação construída/existente. No Brasil, ainda não existe uma certificação nacional específica para o desempenho energético operacional (DEO) de edifícios (baseado em desempenho real/medido) como encontrado em algumas certificações internacionais.

As bases para um programa do gênero ainda estão em construção, com a criação de benchmarks de consumo por tipologia de edificação. No entanto, caso existisse um programa de etiquetagem energética “em uso”, seriam aplicáveis tecnologias de medição inteligente para fornecer remotamente e de forma periódica as informações com o objetivo de facilitar, automatizar e tornar mais preciso o processo de coleta de dados e, conseqüentemente, aumentar o impacto da certificação das edificações em operação. Entendendo-se aqui o Medidor Inteligente como um equipamento a favor do usuário de energia e não como elemento integrador das funcionalidades de uma rede inteligente nem como o garantidor dos interesses de controle e supervisão das concessionárias de energia.

As informações físicas e estruturais sobre o edifício (tipologia, área útil e endereço, por exemplo) não têm muita variação de um ano para o outro. Porém, o desempenho energético pode variar. Nesse sentido, Etiqueta PBE Edifica para edificação construída funcionaria como base para uma certificação de desempenho energético operacional criando a possibilidade de avaliar usos inadequados, perda de rendimento de certos sistemas, susceptibilidade de alteração das propriedades da envoltória por falta de manutenção, entre outros. Esse tipo de informação permitiria uma tomada de decisão em favor de medidas simples de eficiência energética, que propiciam grande impacto no consumo, em detrimento de grandes e caras reformas [177].

Quadro 13 – Principais tecnologias digitais utilizadas na certificação de edifícios. Fonte: Elaboração própria.

Projeto	Construção	Operação	Reforma
Modelagem da Informação da Construção (BIM)			
Modelagem Energética da Edificação (BEM)	Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV)	Sistemas de Gestão de Portfólio Energético	Modelagem Energética da Edificação (BEM)
Fluidodinâmica computacional (CFD)	<i>Blockchain</i>	Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV)	Fluidodinâmica computacional (CFD)
Simulação de iluminação natural e artificial	Computação em Nuvem	<i>Blockchain</i>	Simulação de iluminação natural e artificial
Sistemas de Gestão de Portfólio Energético		Computação em Nuvem	Sistemas de Gestão de Portfólio Energético
Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV)		Medidores Inteligentes	Softwares para Análise de ciclo de vida (ACV)
<i>Blockchain</i>			<i>Blockchain</i>
Computação em Nuvem			Computação em Nuvem

3.4.2 Tecnologias e inspeção remota para certificação de edificações

No que diz respeito às inspeções remotas, as tecnologias de captura e transmissão de imagens e documentos, *Blockchain*, segurança de dados e contratos digitais, inseridas em plataformas computacionais possibilitam que as orientações, preconizadas pelas normas descritas a seguir, para realizá-las possam ser seguidas com maior transparência, rastreabilidade e agilidade. Estas plataformas podem se materializar em uma gama de dispositivos e vários produtos no mercado.

A inspeção (ou auditoria) remota, realizada parcial ou completamente à distância, pode utilizar aplicativos de dispositivos móveis ou computador e abranger tudo que uma avaliação presencial normalmente incluiria, seguindo o processo padrão de auditoria ao usar a tecnologia para a verificação das conformidades. Convém que o auditado (edifício) e a equipe auditora (certificadora) utilizem protocolos previamente combinados, incluindo dispositivos requeridos, Softwares etc. e assegurem os requisitos apropriados para acesso remoto, podendo incluir: videoconferência e trabalho colaborativo por meio de entrevistas e reuniões, comunicação interativa de forma síncrona (em tempo real), acesso online a registros e documentos e gravação de evidências de auditorias através de fotos e vídeos, dentre outros.

Após ter sido publicada pela *International Organization for Standardization* (ISO) em julho de 2018, a Norma ISO 19011:2018 foi publicada no Brasil pela ABNT em dezembro de 2018, oficializando sua terceira edição atualizada, que cancelou e substituiu a sua edição de 2012. Uma das mudanças na revisão da Norma foi exatamente a inclusão da possibilidade de técnicas de auditoria remota, alinhada com os avanços de recursos tecnológicos que viabilizam estas atividades. A Norma define auditoria como um processo sistemático, independente e documentado para obter evidência objetiva e avaliá-la objetivamente para determinar até que ponto os critérios de auditoria foram cumpridos. A Norma ABNT NBR ISO 19011:2018 inclui em seu Anexo "A" diretrizes para a realização das auditorias virtuais/remotas em qualquer local que não o local do auditado, dentre outras [4]:

- Nunca gravar pessoas sem sua permissão e solicitar com antecedência a permissão para se fazer cópias de captura de tela e de documentos de qualquer tipo;
- Solicitar e utilizar para o seu entendimento do layout do local plantas baixas/diagramas do local em formato digital;
- Ter planos de contingência e comunicá-los (por exemplo, interrupção de acesso, uso de tecnologia alternativa);
- Auditor e auditado devem tomar medidas para garantir que a segurança e a confidencialidade sejam mantidas durante o desenvolvimento das atividades.

O desempenho da auditoria remota, assim como nas presenciais, se baseia no envolvimento entre o auditor e o auditado (com ou sem interação humana) e a tecnologia usada para conduzir a auditoria. Se uma auditoria requerer o uso de uma equipe com múltiplos membros, métodos presenciais ou remotos podem ser usados simultaneamente. Aplicar uma variedade e combinação de diferentes métodos de auditoria pode otimizar a eficiência e eficácia do processo de auditoria e do seu resultado, conforme preconiza a referida norma.

As atividades de auditoria remota interativa se realizam por tecnologias de comunicação integradas às de segurança de dados na condução de entrevistas, na observação remota do trabalho realizado, no preenchimento de listas de verificação e questionários e na condução de análise crítica documental com a participação do auditado. Atividades de auditoria não interativa não envolvem interação humana com pessoas que representam o auditado, mas envolvem a análise crítica documental. Frequentemente as auditorias de documentos e de escritório são consideradas como parte de uma auditoria maior. A etapa de Inspeção de Projeto (seja pelo método prescritivo ou pelo método de simulação) da Etiqueta PBE Edifica, realizada pelos inspetores dos OIA - Organismos de Inspeção Acreditados pelo Inmetro, poderia ser considerada como uma auditoria remota de análise documental, por exemplo.

Já a Norma ABNT NBR ISO 17021-1:2016 estabelece os requisitos para um organismo de certificação realizar suas auditorias de certificação. A referida Norma prevê a auditoria remota em três requisitos: controle operacional, preparação do plano de auditoria e generalidades [222;223].

Conforme o *International Accreditation Forum* (IAF) [223], à medida em que as tecnologias digitais se tornam cada vez mais sofisticadas, é importante poder utilizá-las para melhorar a eficácia e a eficiência das auditorias/avaliações e também a apoiar e manter a integridade de todo o processo. Estas tecnologias podem ser utilizadas para coleta, armazenamento, recuperação, processamento, análise e transmissão de informações. Consideram-se *Software* e *hardware* tais como *smartphones*, dispositivos portáteis, *laptops*, *desktops*, *drones*, câmeras de vídeo, tecnologias utilizadas acopladas ao corpo humano (*wearable*), inteligência artificial e outros. O documento IAF MD 4:2018, publicado pelo IAF, cita exemplos de tecnologias para as auditorias (lista exemplificativa e descrição) [223]:

- Reuniões por meio de teleconferência, incluindo áudio, vídeo e compartilhamento de dados;
- Auditoria/avaliação de documentos e processos de certificação/acreditação por meio de acesso eletrônico remoto, de forma síncrona (em tempo real) ou assíncrona (quando aplicável);
- Gravação de informações e evidências por meio de câmeras still, ou gravações de áudio/vídeo;

- Permissão de acesso visual/áudio a locais remotos ou potencialmente perigosos.

Em grande escala, os custos burocráticos de levantar e validar informações de consumo energético para uma grande quantidade de edifícios todo ano (ou todo mês) podem ser muito elevados. Desta forma, seria interessante considerar a automatização do processo de envio de dados para os auditores/inspetores das certificadoras. Medidores inteligentes com protocolos de comunicação padronizados poderiam permitir essa funcionalidade e possibilitar a renovação automática, mensal ou anual, dos certificados, com custos mínimos [177].

Em menor escala, já é possível utilizar aplicativos e Softwares para automatizar e agilizar os processos de inspeção e auditorias energética que, em comparação com uma abordagem convencional de auditoria, em muito reduzem o tempo do avaliador na coleta de dados, no desenvolvimento de diversos tipos de análises e na emissão de relatórios. Os Softwares vêm sendo configurados para gerenciar diferentes tipos de avaliação, desde uma miniauditoria mais simples, onde são identificados ganhos rápidos, até investigações mais completas que analisam equipamentos e serviços das edificações [224-229].

Diversas funcionalidades podem ser inseridas nos aplicativos de auditorias energéticas no sentido de auxiliar e apoiar as auditorias/inspeções nas edificações, remotas e presenciais, para fins de certificação das edificações:

- Registro de vários tipos de equipamentos, quantidades e horas de uso;
- Utilização da câmera do dispositivo para adicionar fotos da área sob inspeção;
- Inserção de plantas baixas ou esboços manuais para marcar visualmente os dados dos aparelhos;
- Transcrição de dados de auditoria do campo enviando para a nuvem;
- Soluções a partir de “kits” predefinidos ou propor uma solução personalizada;
- Relatórios dos custos estimados de economia de acordo com fase do ciclo de vida da edificação.

Para aferição de medidas e captura de detalhes de elementos construtivos, vale ressaltar a possibilidade de uso de tecnologias avançadas, com equipamentos de varredura a laser que agilizam o levantamento métrico de ambientes e fachadas, incluindo uma varredura térmica. As informações coletadas são armazenadas em uma nuvem de pontos que junta todas as partes mapeadas e a partir da qual um modelo tridimensional paramétrico pode ser construído para fins de registro da situação encontrada. Também poderiam ser utilizados drones para coletar os dados dimensionais por meio de fotografias aéreas. Com o auxílio de técnicas de fotogrametria, faz-se a vetorização das imagens para a incorporação nos modelos

tridimensionais (restituição estereofotogramétrica). Na fase de construção, o laser scanner também poderia ser bastante útil para registro da evolução da obra e o atendimento aos critérios de sustentabilidade exigidos pelas certificações, reduzindo as visitas *in-loco* e melhorando a segurança no processo de trabalho dos auditores/inspetores (riscos físicos ou de contaminações) [16;231-233].

O registro em papel é totalmente eliminado, pois o avaliador pode levantar e analisar os dados coletados usando modelos de cálculo já embutidos nos aplicativos, para uso no local ou no escritório, e um recurso de geração de relatórios permite recomendações e adaptações dos resultados para o cliente, resultando em um relatório de auditoria personalizado. Dados como fatores de emissões de gases do efeito estufa, condições climáticas do local, requisitos específicos de normativas, biblioteca de materiais de construção e custos de reformas podem ser atualizados regularmente.

Módulos específicos também podem ser explorados e que aumentariam substancialmente a qualidade das auditorias/inspeções tais como a inserção nas plataformas e Softwares de módulos de orçamento para a criação e comparação de diferentes propostas para cada tipo de fonte de energia, módulos para avaliação individual dos diversos sistemas (iluminação, ar condicionado, aquecimento de água etc.) e módulos com funcionalidades ligadas à benchmark, com a capacidade de mostrar o desempenho atual do edifício em comparação com dados referenciais típicos de edifícios semelhantes (por tipologia e/ou porte).

A implantação de *benchmarks* pode ser realizada por meio de etiquetas prediais, registrando o consumo normalizado do edifício e comparando com um indicador apropriado, com o objetivo de classificar sua eficiência. A Diretiva Europeia 2010/31/UE tem como princípio chave a implantação de benchmarking e etiquetagem energética de edifícios em todos os países membros da União Europeia. Com uma abordagem holística e visando demonstrar a eficácia das avaliações energéticas das edificações nos certificados de desempenho operacional e preencher a ausência de protocolos adequados para a inclusão de tecnologias inteligentes e inovadoras, por meio do Projeto H2020 ePANACEA – *Smart European Energy Performance Assessment & Certification*, foi desenvolvida uma plataforma para avaliação e o desenvolvimento de uma nova geração de certificação dos edifícios europeus que integra avançadas técnicas de simulação dinâmica, análise de big data, modelagem inversa, dentre diversas outras funções [221;230].

No Brasil, em relação a esse assunto, vale destacar o trabalho que vem sendo realizado pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) referente à construção da Plataforma de Benchmarking Energético, desenvolvida para tipologias específicas (agências bancárias, escritórios corporativos, prédios públicos, condomínios residenciais, etc.) [234].

4. Conclusões

Este estudo alcançou o seu objetivo de analisar diferentes temas relativos às tecnologias digitais aplicadas ao segmento de edificações com o objetivo de fortalecer as ações de eficiência energética.

Os temas abordados foram: principais tecnologias aplicadas por fase e por tipologia; o *status quo* destas tecnologias no Brasil e em outros países; os instrumentos normativos e legais que suportam as políticas de eficiência energética em edificações, de redes e medidores inteligentes e de digitalização direcionada ao segmento de edificações; o conceito de inteligência adotada na operação dos edifícios; a gestão de demanda de eletrodomésticos, iluminação e climatização; gestão da demanda de edifícios conectados; o mercado de medidores eletrônicos vinculados a gestão de edifícios, experiência internacional na implementação dos sistemas de monitoramento e gestão inteligente; e tecnologias de certificações de desempenho em edificações e de inspeção remota tendo como base a Norma ABNT NBR ISO 19011:2008 - Diretrizes para auditoria de sistemas de gestão.

Cada tema carrega sua própria complexidade na medida que o segmento de edificações é composto de diversas realidades e agentes como incorporadoras, construtoras, escritórios de projetos, administradores prediais, usuários, fornecedores e fabricantes de materiais e prestadores de serviço. Cada ator traz consigo sua própria diversidade seja nos portes, nos objetivos específicos, nas condições financeiras, nos desafios específicos como na afinidade de adoção de tecnologias no seu cotidiano. Esta complexidade se eleva por ainda estar inserida em um ambiente regulatório bastante heterogêneo, alto nível de informalidade e o setor da construção civil ser mundialmente conhecido como conservador na adoção de tecnologias digitais.

Um exemplo desta complexidade, foi a estratificação do setor residencial que tem diversas definições e classificações, para isto, foi elaborado um estudo adicional que se encontra no Apêndice 2 que indicou dividi-la em poucas categorias e de uma forma mais ampla, estabelecendo a estratificação em residencial unifamiliar, multifamiliar e habitações de interesse social. Esta indicação foi aprovada pelos patrocinadores deste estudo e não discrimina diferenças de poder aquisitivo que interferem na adoção das tecnologias.

As edificações denominadas habitações de interesse social trazem características peculiares: geralmente seus projetos são replicados e edificadas por construtoras de porte médio ou grande em grandes obras, isto permite que tais

construtoras possam adotar várias tecnologias de projeto e construção; a ausência de relação construtora-clientes nos projetos e o baixo poder aquisitivo dos moradores limita a aplicabilidade de tecnologias nas fases de operação e reforma, assim como aquelas tecnologias que propiciam um engajamento do cliente na fase de projeto.

Na avaliação das tecnologias digitais por fase do ciclo de vida da edificação e por tipologia, vinte tecnologias foram identificadas, descritas e analisadas por fase da edificação e tipologia. Os itens 2.1.1 a 2.1.5 mostram as tecnologias por fase, distribuídas em sete domínios de atuação e a descrição da sua aplicação, além de considerações sobre o seu uso entre as cinco tipologias. A disponibilidade comercial de cada tecnologia é mostrada nas tabelas dos itens 2.2.1 a 2.2.5. O Apêndice 3 mostra um quadro sintético da relação entre estas tecnologias, as fases do projeto e tipologias, aos distritos, bem como sua relação com a indústria 4.0.

Nas fases de projeto, os agentes mais envolvidos são escritórios ou departamentos de arquitetura e projetos e o cliente nos casos das tipologias comerciais, públicas e residências e condomínios de alto padrão. Esta característica leva a que a adoção das tecnologias ocorra de forma acelerada. Pode-se dizer que tecnologias como a Modelagem da Informação da Construção (BIM), Fluidodinâmica Computacional (CFD) e a Simulação de Iluminação Natural e Artificial já se encontram em um maior estágio de maturidade com muita disponibilidade comercial tanto no Brasil como em outros países. Outras tecnologias como o *Blockchain* têm sua utilização em outros países, mas não no Brasil.

Na fase de construção, os agentes mais envolvidos são construtoras, incorporadoras e empresas de engenharia. Foram identificadas soluções como Modelagem da Informação da Construção (BIM), Softwares para Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), Realidade Aumentada e Softwares de Gerenciamento Ágil, que estão disponíveis tanto no mercado nacional, quanto em outros países. Para as soluções digitais Impressão 3D e *Blockchain*, foram identificadas inúmeras iniciativas em nível internacional, ao passo que no Brasil ainda estão em desenvolvimento, sendo em sua grande maioria oferecidas por *startups*. O potencial de utilização de tecnologias digitais nesta fase é grande, principalmente no Brasil.

Nos canteiros de obra, há muito espaço para capacitação e educação ambiental, economia de energia e de outros insumos.

Os administradores de edifícios comerciais e públicos e de grandes condomínios, bem como os consumidores em geral são os agentes atuantes na fase de operação. As utilizações das tecnologias variam de intensidade com porte, finalidade, regulação com as concessionárias e o poder aquisitivo do responsável pela gestão da edificação. As tecnologias associadas ao controle e gerenciamento de equipamentos e sistemas são as mais utilizadas, os programas de simulação e modelagem também são utilizados em edificações mais complexas. A disseminação das tecnologias digitais e dos controles é facilitada, principalmente, por dispositivos móveis e o poder aquisitivo é um forte balizador da intensidade de uso no setor residencial.

Na fase de reforma de edificações, para os grandes edifícios nos setores comercial, público e residencial de alto padrão, os escritórios de projeto, as firmas de engenharia e construtoras são os grandes atores, assim as tecnologias usadas possuem grande semelhança com as conclusões para a matriz de resultados para a fase de projeto e construção. Excetuando-se pela presença das soluções em Impressão 3D, que, como na fase de construção, estão disponíveis em nível internacional e em desenvolvimento no contexto nacional. Para as reformas de edifícios e residências de médio e baixo padrão, e habitações de interesse social, o uso de tecnologias digitais é incipiente.

No que diz respeito à fase de demolição, para os grandes edifícios comerciais e públicos, as soluções digitais referentes à Modelagem da Informação da Construção (BIM), Softwares para avaliação de ciclo de vida (ACV), *Blockchain*, Softwares de Gerenciamento Ágil e Realidade Aumentada têm sido empregadas por construtoras e firmas especializadas tanto no mercado nacional quanto em outros países. Para as soluções digitais em *Blockchain*, não há registro de uso no Brasil, somente em outros países. A demolição de edifícios e residências de pequenos portes dificilmente utilizam tecnologias digitais.

Em termos de arcabouço normativo e regulatório referente à eficiência energética que possam impactar o segmento de edificações, destacam-se os instrumentos regulatórios relacionados às redes elétricas inteligentes que possam ampliar a digitalização neste segmento; e políticas diretamente ligadas à digitalização nas edificações. Pela análise deste arcabouço apresentada na seção 2.3 deste documento, pode-se afirmar que os instrumentos regulatórios se encontram em estágios distintos de maturidade e implantação. Embora se reconheça que este arcabouço esteja consolidado com as atribuições estabelecidas entre os diversos atores e a inserção no planejamento energético, no que diz respeito ao incentivo à digitalização nas edificações preconiza-se um longo caminho a ser percorrido que passa por discussões sobre o

estabelecimento de novos padrões construtivos, certificações mandatórias, promoção do desempenho energético operacional, mudança de cultura no setor da construção civil e de seus mais diversos clientes, entre outros. Forte impulso à disseminação das tecnologias mencionadas ocorrerá quando a regulação, das redes e medidores inteligentes e geração distribuída, caminhar para tornar o setor elétrico e os outros setores de insumos energéticos mais flexíveis no sentido de precificação ao longo do dia e inclusão de novas fontes de geração de energia, principalmente distribuída. As políticas de digitalização em edificações tiveram significativo avanço a partir de 2018 com decretos, leis e projetos de lei nas áreas de conexão de dispositivos, cidades inteligentes e ciclo de vida dos dados.

Pode-se concluir que há, no Brasil, instrumentos regulatórios relevantes que podem alavancar o processo de digitalização das edificações no país com foco na eficiência energética. Entretanto, a digitalização requer investimentos vultosos, seja em novas tecnologias, infraestrutura e treinamento. Um exemplo disso é a tecnologia 5G que teve um leilão específico em 2021. As políticas nas três áreas mencionadas estão em grau de maturidade distintos, mas todas precisam de aprimoramento para impulsionar de forma efetiva este mercado.

As tecnologias digitais de gestão da demanda vinculadas à redução do consumo de energia têm gradativamente se popularizado pelos avanços em termos de conforto e facilidade de uso do controle por celulares, tablets e computadores e pela redução de preço de equipamentos inteligentes como equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede ou de dispositivos que possam agregar inteligência como tecnologias como interruptores inteligentes e tomadas inteligentes. Em termos de tipologias, ela é uma realidade na gestão de grandes edifícios comerciais e públicos, e em residências de alto padrão. No que se refere à gestão de demanda, a regulação do setor elétrico a exige para consumidores do grupo tarifário A e as tecnologias digitais aperfeiçoam este gerenciamento. Para consumidores residenciais, excetuando aos que optarem pela tarifa branca, a gestão da demanda não é mandatória, logo a penetração destas soluções digitais é muito pequena para este fim. Em vários países desenvolvidos como o EUA e países da União Europeia, as concessionárias de energia oferecem tarifas diferenciadas se o usuário, tanto industrial como residencial, permitir que em determinadas condições, a concessionária desligue remotamente algumas de suas cargas. No caso residencial, o uso de IoT nestes equipamentos é comum.

Em termos de distrito inteligente, quando as edificações são analisadas em conjunto, percebe-se uma nova camada de possibilidades de otimização e compartilhamento, a partir da adoção de tecnologias específicas e/ou da integração entre elas, bem como na possibilidade de gestão compartilhada de ativos, auxiliada por artefatos digitais.

É importante verificar possibilidades para que as edificações possam operar em conjunto, quais as restrições e condições mais adequadas para auferir maiores benefícios ao distrito. Pode-se exemplificar como áreas impactadas pelas soluções digitais, os serviços compartilhados, como sistemas de geração de energias renováveis, aquecimento solar térmico, sistemas compartilhados de fornecimento de água quente, tanques de termoacumulação, sistemas de fornecimento de água gelada e/ou fluidos refrigerantes (para condicionamento de ar), sistemas de captação tratamento e armazenamento de águas de chuva e ou águas residuais, etc. Para tanto, as classes de soluções relacionadas à simulação, como Modelagem Energética Urbana (UBEM), Fluidodinâmica Computacional (CFD), Simulação de Iluminação Natural e Artificial, Softwares para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e programas de Simulação e Gerenciamento de Portfólio Energético são essenciais. Para a fase de operação, em si a gestão da informação é imprescindível, assim como os protocolos de automação e tecnologias associadas, o que faz com que as tecnologias de provimento transversal de infraestrutura de TI, como a computação em nuvem; de integração, como Modelagem da Informação da Construção (BIM) e ferramentas de gestão de portfólio energético; as de registro e automação de transações, como *Blockchain*, seus contratos inteligentes, inteligência artificial e os hardwares associados (sensores, atuadores e interruptores inteligentes); as que suportam a resposta da demanda, incrementadas por ferramentas de informação ao usuário e gamificação, como tomadas inteligentes e carregadores (bidirecionais) de carros elétricos (que podem funcionar como baterias ou no breaks para auxiliar no deslocamento de carga), sejam essenciais.

Os medidores inteligentes na gestão da demanda de edificações são utilizados para medir os diversos parâmetros das edificações e não se restringem à medição de energia elétrica. Aliás, uma infraestrutura de medição inteligente deve ser composta por equipamentos que medem grandezas energéticas (medidores inteligentes, inclusive), por sistemas e *Software* que armazenam, gerenciam e analisam os dados medidos. As tecnologias de medição inteligente aplicadas são: medidores inteligentes; sistemas de gestão predial (BMS); assistentes virtuais; tomadas inteligentes; carregadores de veículos elétricos; *Blockchain*; e BIM. As aplicações das tecnologias abrangem todas as tipologias de edificação com exceção da de habitações de interesse social que somente podem utilizar medidores eletrônicos para atender a um regime tarifário diferenciado. Por se tratar de medição, o uso destas tecnologias se refere à fase de operação. No entanto, o uso dos medidores inteligentes com vistas a uma maior resposta da demanda é incipiente no país, sendo que a principal função no uso deste equipamento é para o faturamento de energia.

As experiências internacionais de instalação de medidores inteligentes nas edificações estudadas nos EUA, EU, Alemanha e Reino Unido mostram o êxito na aplicação destes equipamentos e se percebeu que todas as funcionalidades destes equipamentos podem ser implementadas em qualquer edificação, sem distinção de tipologia. Isto possibilita uma melhor gestão e operação dos recursos energéticos nestes países. Ainda, fica evidente que a funcionalidade de gerenciamento energético na modalidade pré-pago é aplicável a famílias de maior vulnerabilidade (medida de cunho social). No entanto, há uma preocupação que estas famílias não tenham perda de conforto.

A terceira edição da Norma ABNT NBR ISO 19011:2008 - Diretrizes para auditoria de sistemas de gestão traz como inovação, a inclusão da possibilidade de técnicas de auditoria remota, alinhada com os avanços de recursos tecnológicos que viabilizam estas atividades e em seu Anexo "A" apresenta diretrizes para a realização das auditorias virtuais/remotas em qualquer local que não o local do auditado.

Existem diversos aplicativos e Softwares sendo usados para automatizar e agilizar os processos de auditorias que, em comparação com uma abordagem convencional de auditoria, em muito reduzem o tempo do avaliador na coleta de dados, no desenvolvimento de diversos tipos de análises e na emissão de relatórios.

Em relação às tipologias de edifícios, a certificação, suas plataformas digitais e as inspeções remotas podem ser utilizadas para todas as tipologias. A adoção de uma certificação é geralmente impulsionada por um arcabouço regulatório mandatário. Este não é o caso brasileiro. Ressalta-se que as tecnologias digitais por trazer agilidade, confiabilidade e redução de recursos humanos e financeiros, notadamente nas inspeções remotas, podem se constituir em um grande impulsionador das certificações voluntárias no país que hoje não são massivamente adotadas por diversas barreiras tais como ausência de conhecimento e alto custo para pequenas edificações.

Como conclusão final, afirma-se que existe um grande e crescente potencial de utilização das soluções digitais em edificações. Para cada fase do ciclo de vida da edificação e tipologia existem diferentes agentes envolvidos com diferentes barreiras e desafios. Os agentes também se diferenciam de forma intrínseca por porte, poder aquisitivo, conhecimento e cultura de adoção de tecnologias. A complexidade desta área se eleva com um arcabouço regulatório complexo que envolve várias esferas de governo.

A tendência mundial de utilização crescente das tecnologias digitais em edificações impulsiona o mercado nacional. Os principais fatores impulsionadores do uso destas tecnologias para eficiência energética num futuro próximo são a redução do consumo de insumos energéticos, a flexibilidade e facilidade de gerenciamento da energia e demanda que se inserem no contexto da modernização do setor elétrico, a redução dos custos de serviços e equipamentos das soluções digitais, o comportamento mais atento dos consumidores em relação à eficiência energética com as facilidades de acesso às informações e de melhor controle de equipamentos, o menor receio de uso de tecnologias digitais e a digitalização em outros setores da sociedade de forte interrelação como o setor elétrico.

Referências

- [1] EUROPEAN COMMISSION. **Factsheet: Energy Performance in Buildings Directive**. Brussels: European Commission, 2021. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/document_s/buildings_performance_factsheet.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [2] BINZ, S. et al. **Inteligentes e eficientes: Soluções digitais para economia de energia em edifícios**. Tradução: SAID tradução simultânea. Programme for Energy Efficiency in Buildings (PEEB) Secretariat, 2019. Disponível em: https://www.peeb.build/imglib/downloads/PEEB_FEEDU_S_Solu%C3%A7%C3%B5es_Digitais.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [3] GIZ. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. **Termo de referência para realização de estudo sobre digitalização e eficiência energética no setor de edificações no Brasil**. Parcerias Energéticas PN: 18.9022.7-005.00. Brasília: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. GIZ. Parceria Energética Brasil-Alemanha, junho de 2021.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 19011:2018 Versão Corrigida:2019**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=415425>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [5] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **Guia 1 – Processo de Projeto BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/Guia_BIM01.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [6] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **GUIA 2 – Classificação da informação no BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA_BIM02_20171101_WEB.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [7] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **GUIA 3 – BIM na Quantificação, orçamentação, planejamento e gestão de serviços da construção**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA_BIM03_20171101_web.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [8] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **GUIA 4 – Contratação e elaboração de projetos BIM na arquitetura e engenharia**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUI_BIM04_20171101_web.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [9] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **GUIA 5 – Avaliação de desempenho energético em Projetos BIM a**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA_BIM05_20171101_web.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [10] AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. ABDI. **GUIA 6 – A implantação de processos BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. Brasília, DF: ABDI, 2017. Disponível em: https://api.abdi.com.br/file-manager/upload/files/GUIA_BIM_06_20171123_WEB.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [11] LIM, Y-W. et al. Review of BIM for existing building sustainability performance and green retrofit. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, v. June 2021, p.110-125, 2021. DOI: 10.22712/susb.20210010.
- [12] GERBERT, P.; CASTAGNINO, S.; ROTHBALLER, C.; RENZ, A.; FILITZ, R. **The transformative power of building information modeling**: Digital in engineering and construction. Boston, M.A.: Boston Consulting Group, BCG, 2016. Disponível em: <https://www.bcg.com/publications/2016/engineered-products-infrastructure-digital-transformative-power-building-information-modeling>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [13] CALDAS, L.; CARVALHO, M.; TOLEDO FILHO, R. Inserção da ACV no processo de projeto de edificações: avaliação de alternativas e ferramentas computacionais para a prática de mercado. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo|Paranoá** 28, p. 1-21, 2020. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n28.2020.09.
- [14] BAHARUDIN, N.H.; MANSUR, T.M.N.T.; R. ALI, R.; SOBRI, N.F.A. Smart lighting system control strategies for commercial buildings: a review. **International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration**, v.8, n.74, p. 45-53, 2021. DOI: 10.19101/IJATEE.2020.S2762173.
- [15] SALERNO, I.; MIGUEL F. ANJOS, M. F.; KENNETH MCKINNON, K.; GÓMEZ-HERRERA, J.A. Adaptable energy management system for smart buildings. **Journal of Building Engineering**, v.44, article ID 102748, 2021. DOI: 10.1016/j.jobee.2021.102748.
- [16] MANCINI, F.; LO BASSO, G.; DE SANTOLI, L. Energy use in residential buildings: impact of building automation control systems on energy performance and flexibility. **Energies**, v.12, article ID 2896, 2019. DOI: 10.3390/en12152896.
- [17] SILVA Jr., D. S.; SANTOS, R.C.; SANTOS, I.L. Inovações da indústria 4.0 na gestão de processos na prestação de serviços na construção civil. **Future Studies Research Journal**, v.12, n.3, p. 394 – 415, 2020. DOI: 10.24023/FutureJournal/2175-5825/2020.v12i3.500.
- [18] YANG, A.; HAN, M.; ZENG, Q.; SUN, Y. Adopting Building Information Modeling (BIM) for the development of smart buildings: a review of enabling applications and challenges. **Advances in Civil Engineering**, v.2021, article ID 8811476. DOI: 10.1155/2021/8811476.
- [19] OLIVER, W. **Digitalization of the construction industry: the revolution is underway**. 2018. Disponível em: https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/july/OliverWyman_Digitalization_in_the_construction_industry_web_final.PDF. Acesso em: 04 out. 2021.
- [20] GEORGAKARAKOS, A.D.; VAND, B.; HATHWAY, E.A.; MAYFIELD, M. Dispatch strategies for the utilisation of battery storage systems in smart grid optimised buildings. **Buildings**, v.11, n.10, p.433-453, 2021. DOI: 10.3390/buildings11100433.
- [21] AKBARI, H. et al. Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 192, p.144-168, 2019. DOI: 10.1016/j.solener.2018.03.052.
- [22] FONTENOT, H.; BING, D. 2019. Modeling and control of building-integrated microgrids for optimal energy management – A review. **Applied Energy**, v. 254, article ID 113689, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113689.
- [23] LIM, Y.W.; HY CHONG, H.Y.; PCH LING, P.C.H.; TAN, C.S. Greening existing buildings through Building Information Modelling: A review of the recent development. **Building and Environment**, v.200, article ID 107924, 2021. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107924.
- [24] ENERGY PLUS. **Site institucional**. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [25] OPENFOAM. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.openfoam.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [26] CBE Thermal Comfort Tool. **Site institucional**. Disponível em: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [27] TAUFLOW. **Site institucional**. Disponível em: <https://taufLOW.com/simulacao-construcao-civil>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [28] ESSS. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/aiguasol-utiliza-ansys-fluent-em-projetos-de-ventilacao-e-otimizacao-energetica/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [29] SIMSCALE. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.simscale.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [30] MORAIS, J. M. da S. C.; LABAKI, L. C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa, Minha Vida. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 223-244, jan./mar. 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100133.
- [31] LUKIANTCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. São Carlos, 2015, 385 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- [32] COUTINHO, L. G.; SHIMOMURA, A. R.P.; MICHALSKI, R.L.X.N.; NAZARETH, S.B.M. **Simulações computacionais em CFD de janelas acústicas com aberturas para ventilação natural**. In: Anais: Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais. 2020. Disponível em: <https://entac2020.com.br/anais-2020/artigos/513.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [33] AMARAL, D. O. **Avaliação das metodologias de ventilação natural da normalização brasileira de desempenho térmico e eficiência energética de edificações habitacionais**. Belo Horizonte, 2017, 154p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Escola de Arquitetura. Universidade Federal de Minas Gerais.
- [34] ANSYS. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/fluids>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [35] CREATIVE SOLUTIONS. **Site institucional**. Disponível em: <https://creative-solutions.eng.br/solucoes/dinamica-de-fluidos/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [36] BLUECFD. **Site institucional**. Disponível em: <http://bluecfd.github.io/Core/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [37] BUTTERFLY. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>. Acesso em: 04. out. 2021.
- [38] PHOENICS. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.cham.co.uk/phoenics.php>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [39] AL-GHAILI, A.M.; KASIM, H.; AL-HADA, N.M.; OTHMAN, M.; SALEH, M.A. A review: buildings energy savings - lighting systems performance. **IEEE Access**, v.8, p. 76108-76119, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2989237.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1:2021** – Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=477978>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [41] DIALUX. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.dial.de/en/dialux/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [42] RADIANCE. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.radiance-online.org/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [43] LABEEE UFSC. **Site institucional**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/Softwares/analysis>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [44] INOVATECH ENGENHARIA. **Site institucional**. Disponível em: <https://inovatech engenharia.com.br/atuacao/simulacao-termica-e-luminica/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [45] DAYSIM. **Site institucional**. Disponível em: <http://daysim.ning.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [46] DIDONÉ, E.L.; PEREIRA, F.O.R. **Integrated computer simulation for considering daylight when assessing energy efficiency in buildings**. In: Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 2011. Disponível em: http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1668.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [47] KATUNSKÝ, D.; DOLNÍKOVÁ, E.; DOROUDIANI, S. Integrated lighting efficiency analysis in large industrial buildings to enhance indoor environmental quality. **Buildings**, v.7, n.2, article ID 7020047, 2017. DOI:10.3390/buildings70200472017.
- [48] CINTRA, M.S. **Arquitetura e luz natural: a influência da profundidade de ambientes em edificações residenciais**, 2011, 158p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pesquisa e Pós-graduação. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília.
- [49] SOUZA, M.C.; GRIGOLETTI, G. C.; VAGHETTI, M.A.O. **Avaliações dinâmicas da iluminação natural no protótipo de casa popular eficiente da UFSM**. In: II Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2017. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/434/2020/08/Euro-ELECS_2017_paper_187.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [50] INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION. **Building energy simulation tools web directory (BEST-D)**. Wisconsin: IBPSA, 2021.
- [51] AGI32. **Site institucional**. Disponível em: <https://lightinganalysts.com/Software-products/agi32/overview/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [52] DIVA-FOR-RHINO/CLIMATESTUDIO/SOLEMMMA. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.solemma.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013** – Iluminação em ambientes de trabalho – Parte 1 – Interior. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=196479>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [54] UGREEN. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/consultoria-em-sustentabilidade/>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [55] BOSCARDIN, L; FLÓRIO, W. O acesso à luz natural em edifícios residenciais verticais: Análises paramétricas de iluminâncias a partir de critérios das legislações urbano-construtivas do município de São Paulo. **Revista Projetar**, v.6, n.3, p. 160-173, 2021.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15215-4:2005** - Iluminação natural. Iluminação natural. Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações - Método de medição Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=536>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [57] SEFAIRA. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.sketchup.com/products/sefaira>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [58] PVSYST. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [59] HONEYBEE. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [60] RETScreen. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [61] CABEZA, L.F.; RINCÓN, L.; VILARIÑO,V.; PÉREZ,G.; CASTELL,A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 394-416, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.037.
- [62] RISTIMÄKI, M.; SÄYNÄJOKI, A.; HEINONEN, J.; JUNNILA, S. Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. **Energy**, v. 63, p. 168-179, 2013. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.030.
- [63] HU, M., SIMON, M., FIX, S. et al. Exploring a sustainable building's impact on occupant mental health and cognitive function in a virtual environment. **Scientific Reports**, v. 11, p.5644 -5657, 2021. DOI:10.1038/s41598-021-85210-9.
- [64] REVIT. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview?mktvar002=4302471|SEM|12520386938|115984471341|kwd>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [65] CRAVEIRO, F.; DUARTE, J.P.; BARTOLO, H.; BARTOLO, P.J. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**, v. 103, p. 251-267, 2019. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.03.011.
- [66] XU, J.; MOREU, F. A review of augmented reality applications in civil infrastructure during the 4th industrial revolution. **Frontiers in Built Environment**, 02 June 2021. Article ID 640732. DOI: 10.3389/fbuil.2021.640732.
- [67] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009 versão corrigida:2014** - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=316462>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [68] INOVAHOUSE3D. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [69] PERI 3D. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.peri.com/en/business-segments/3d-construction-printing.html>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [70] CYBE CONSTRUCTION. **Site institucional**. Disponível em: <https://cybe.eu/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [71] APIS COR. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.apis-cor.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [72] XTREEE. **Site institucional**. Disponível em: <https://xtreee.com/en/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [73] MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual displays. **IEICE Transactions on Information Systems**, v.E77-D, n.12, P. pp.1321-1329, 1994.
- [74] NESS, D.; SWIFT, J.; RANASINGHE, D. C.; XING, K.; SOEBARTO, V. Smart steel: new paradigms for the reuse of steel enabled by digital tracking and modelling. **Journal of Cleaner Production**, v.98, p.292-303, 2015. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.055.
- [75] SOMFY. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.somfyprojects.me/why-dynamic-solar-shading-/dynamic-solar-shading>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [76] AMAZON. **AMAZON echo dot**. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Echo-Dot-3%C2%AA-Gera%C3%A7%C3%A3o-Cor-Preta/dp/B07PDHS1H>
- [77] VICTOR VISION. **Victor Vision Displays Inteligentes**. Disponível em: <https://victorvision.com.br/produtos/displays-inteligentes/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [78] AMAZON. **AMAZON echo show**. Disponível em: <https://www.amazon.com/echo-show-10/dp/B07VHZ41L8/>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [79] GUERRA, J.N.; SAKAMOTO, A.R. **Gerenciamento ágil na construção civil com o uso de BIM 4d e 5d**. In: Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. CONTECC. Palmas/TO, 17 a 19 de setembro de 2019.
- [80] MARQUES, C. T.; GOMES, B. M. F.; BRANDLI, L. L. Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 79-90, out./dez. 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000400186.
- [81] YANG, T.; CLEMENTS-CROOME, D.J.; MARSON, M. **Building energy management systems**. In: ABRAHAM, M. (Ed.) Encyclopedia of Sustainable Technologies, p. 291-309, 2017. DOI:10.1016/B978-0-12-409548-9.10199-X.
- [82] KONHÄUSER, W. Digitalization in buildings and smart cities on the way to 6G. **Wireless Personal Communications**, 2021. DOI: 10.1007/s11277-021-09069-9.
- [83] RINALDI, S. et al. **A cognitive strategy for renovation and maintenance of buildings through IoT technology**. In: IECON 2020 - The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 1949-1954, 2020. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254980.
- [84] LANE, K.; BENNICH, P. **Digitalisation opportunities for energy efficiency**. Pretoria: IEA, 2019.
- [85] MARTÍNEZ, I.; ZALBA, B.; TRILLO-LADO, R.; BLANCO, T.; CAMBRA, D.; CASAS, R. Internet of things (IoT) as sustainable development goals (SDG): Enabling technology towards smart readiness indicators (SRI) for university buildings. **Sustainability**, v.13, article ID 7647, 2021. DOI: 10.3390/su13147647.
- [86] GANGOLELLS, M.; CASALS, M.; MACARULLA, M.; FORCADA, N. Exploring the potential of a gamified approach to reduce energy use and carbon emissions in the household sector. **Sustainability**, v.13, article ID 3380, 2021. DOI: 10.3390/su13063380.
- [87] ČULIĆ, A.; SANDRO NIŽETIĆ, S.; ŠOLIĆ, S.; PERKOVIĆ, T.; ČONGRADAC, V. Smart monitoring technologies for personal thermal comfort: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, article ID127685, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127685.
- [88] VAINIO, T.; NIPPALA, E.; KAUPPINEN, T. HVAC's Role in the decarbonisation of the existing buildingstock - case Finland. **E3S Web Conference**, v. 246, article ID 13005. DOI: 10.1051/e3sconf/202124613005.
- [89] EUROPEAN COMMISSION. **Energy efficiency and behavioural change** - Reducing carbon footprint through ICT and sustainable actions. Brussels: European Commission, 2020. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9322a431-01a3-11eb-974f-01aa75ed71a1/#>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [90] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA **Digitalization & Energy**. 2017. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [91] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. **Energy management and building control**. Disponível em: <https://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/115133EMaNdBuildingControls.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [92] AVILA, M. et al. Energy management system based on a gamified application for households. **Energies**, v.14, n.12, article ID 3445, 2021. DOI:10.3390/en14123445.
- [93] PAN, J.; JAIN, R.; PAUL, S. A survey of energy efficiency in buildings and microgrids using networking technologies. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 16, n.3, p. 1709-1731, 2014. DOI: 10.1109/SURV.2014.060914.00089.
- [94] JAKEMAN, A.; ACHELNIK, C.; MAKWANA, V. **Digital technologies and use cases in the energy sector**. Brussels: European Commission, 2020.
- [95] CASADO-MANSILLA, D. et al. A human-centric & context-aware IoT framework for enhancing energy efficiency in buildings of public use. **IEEE Access**, v.6, p. 31444-31456, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2837141.
- [96] AL-GHAILI, A.M.; KASIM, H.; OTHMAN, M.; HASSAN, Z. A review on building energy efficiency techniques. **International Journal of Engineering & Technology**, v.7, n.4, p.35-40, 2018. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.35.22318.
- [97] PETROSANU, D-M.; CĂRUTAȘU, G.; CĂRUTAȘU, N.L.; PÎRJAN, A. A review of the recent developments in integrating machine learning models with sensor devices in the smart buildings sector with a view to attaining enhanced sensing, energy efficiency, and optimal building management. **Energies**, v.12, n.24, article ID 4745, 2019. DOI: 10.3390/en12244745.

- [98] MARIANO-HERNÁNDEZ, D.; HERNÁNDEZ-CALLEJO, L.; ZORITA-LAMADRID, A.; DUQUE-PÉREZ, O.; SANTOS GARCÍA, F A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault. **Journal of Building Engineering**, v. 33, article ID 101692, 2021. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101692.
- [99] KUMAR, A.; SHARMA, S.; GOYAL, N.; SINGH, A.; CHENG, X.; SINGH, P. Secure and energy-efficient smart building architecture with emerging technology IoT. **Computer Communications**, v. 176, p. 207-217, 2021. DOI: 10.1016/j.comcom.2021.06.003.
- [100] KUMAR, N.M.; CHAND, A.A.; MALVONI, M.; PRASAD, K.A.; MAMUN, K.A.; ISLAM, F.R.; CHOPRA, S.S. Distributed energy resources and the application of AI, IoT, and *Blockchain* in smart grids. **Energies**, v.13, article ID 5739, 2020. DOI: 10.3390/en13215739.
- [101] TOUNQUET, F.; ALATON, C. **Benchmarking smart metering deployment in the EU-28**. Final report. Brussels: European Commission, 2020.
- [102] EINI, R.; LINKOUS, L.; ZOHRABI, N.; ABDELWAHED, S. Smart building management system: Performance specifications and design requirements. **Journal of Building Engineering**, v.39, article ID 102222, 2021. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102222.
- [103] BIMERR. **Deliverable D3.5 BIMERR system architecture**. 1st version. 2020. Disponível em: <https://www.bimerr.eu/wp-content/uploads/pdf/BIMERR%20system%20architecture%201st%20version.pdf>. Acesso em: 04 out.2021.
- [104] ZAKERI, B.; CASTAGNETO, G. G.; DODDS, P.E.; SUBKHANKULOVA, D. Centralized vs. distributed energy storage – Benefits for residential users. **Energy**, v.236, article ID 121443, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121443.
- [105] SHARDA, S.; SHARMA, K.; SINGH, M. A real-time automated scheduling algorithm with PV integration for smart home prosumers. **Journal of Building Engineering**, v. 44, article ID 102828, 2021. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102828.
- [106] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT. GIZ. **Uso de novas tecnologias digitais para medição de consumo de energia e níveis de eficiência energética no Brasil**. Mimeo. Brasília: GIZ. 2021.
- [107] FARZANEH, H.; MALEHMIRCHEGINI, L.; BEJAN, A.; AFOLABI, T.; MULUMBA, A.; DAKA, P.P. Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency. **Applied Sciences**, v.11, n.2, article ID 763. DOI: 10.3390/app11020763.
- [108] WAGO. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.wago.com/br/dali>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [109] ENCELIUM. **Site institucional**. Disponível em: <https://encelium.com/solutions/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [110] NVC Lighting. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.nvcuk.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [111] HELVAR. **Site institucional**. Disponível em: <https://helvar.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [112] DALI Alliance. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.dali-alliance.org/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [113] HEC Automação. **Site institucional**. Disponível em: <http://www.hecautomação.com.br/eficienciaenergetica/solucoes/iluminacao.html>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [114] IEC. **IEC 62386-101:2014+AMD1:2018**. CSV. Consolidated version. Digital addressable lighting interface - Part 101: General requirements - System components. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/63236>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [115] AMAZON AMERICANA. **Catálogo Online da Amazon Americana - Produtos para Alexa**. Disponível em: <https://www.amazon.com/gp/browse.html?node=6563140011&>. Acesso em; 04 out. 2021.
- [116] SEBASTIAN, R. et al. Plug-and-play solutions for energy-efficiency deep renovation of European building stock. **Proceedings**, v.2, article ID 1157, 2018. DOI: 10.3390/proceedings2151157.
- [117] DANIOTTI, B. et al. An interoperable BIM-Based toolkit for efficient renovation in buildings. **Buildings**, v. 11, n.7, article ID 271, 2021. DOI: 10.3390/buildings11070271.
- [118] BRASIL. **Portaria Interministerial nº 1.877**, de 30 de dezembro de 1985. Institui o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL. Brasília, 1985.
- [119] BRASIL. **Decreto Presidencial, de 18 de julho de 1991**. Institui o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural – CONPET. Brasília, 1991
- [120] BRASIL. **Lei nº 10.295**, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Brasília, 2001.

- [121] BRASIL. **Decreto nº 4.059**, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. Brasília, 2001.
- [122] BRASIL. **Lei nº 9.991**, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2000.
- [123] BRASIL. **Lei nº 13.280**, de 3 de maio de 2016. Altera a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, para disciplinar a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética. Brasília, 2016.
- [124] BRASIL. **Lei nº 12.187**, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, 2009.
- [125] BRASIL. **Decreto nº 7.390**, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6, 11 e 12 da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. Brasília, 2010.
- [126] BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. Contribuição Nacionalmente Determinada. Brasília, 2015.
- [127] PBE EDIFICA. **Sobre o PBE Edifica**. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/sobre>. Acesso em 23 out. 2021.
- [128] INMETRO. **Portaria nº 42**, de 24 de fevereiro de 2021. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C). Rio de Janeiro, 2021.
- [129] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1:2013 Emenda 1: 2021**, de 30 de março de 2021. Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. São Paulo, 2021.
- [130] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. **Portaria nº 594**, de 18 de outubro de 2011. Aprova o Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEF - Premissas e Diretrizes Básicas. Brasília, 2011.
- [131] ELETROBRAS. **Proposta do Plano Decenal de Eficiência Energética (PDEF)**. Contrato nº ECE-DSS-4299/2019-AP- 4508/2020. Janeiro, 2021
- [132] INSTITUTO ACENDE BRASIL. **Perdas comerciais e inadimplência no setor elétrico**. White Paper. São Paulo, 2017.
- [133] ANEEL. **Resolução Normativa nº 502**, de 7 de agosto de 2012. Regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B. Brasília, 2012.
- [134] ANEEL. **Resolução Normativa nº 863**, de 10 de dezembro de 2019. Aprimora os procedimentos de medição e leitura para acessantes conectados ao sistema de distribuição. Brasília, 2019.
- [135] ANEEL. **Resolução Normativa nº 819**, de 19 de junho de 2018. Estabelece os procedimentos e as condições para a realização de atividades de recarga de veículos elétricos. Brasília, 2018.
- [136] ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, 2012.
- [137] ANEEL. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição - PRODIST. Brasília, 2015.
- [138] ANEEL. **Resolução Normativa nº 786**, de 17 de outubro de 2017. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2017.
- [139] BRASIL. **Lei nº 14.300**, de 7 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília, 2022.
- [140] ANEEL. **Resolução Normativa nº 547**, de 16 de abril de 2013. Estabelece os procedimentos comerciais para aplicação do sistema de bandeiras tarifárias. Brasília, 2013.
- [141] ANEEL. **Resolução Normativa nº 733**, de 6 de setembro de 2016. Estabelece as condições para a aplicação da modalidade tarifária horária branca. Brasília, 2016.
- [142] ANEEL. **Audiência Pública nº 59/2018**. Obter subsídios para a Análise de Impacto Regulatório - AIR- sobre o aprimoramento da Estrutura Tarifária aplicada aos consumidores do Grupo B - Baixa Tensão - Tarifa Binômia. Brasília, 2018.
- [143] ANEEL. **Consulta Pública nº 16/2017**. Ouvir a opinião do consumidor sobre o pré-pagamento de energia elétrica. Brasília, 2017.

- [144] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. **Consulta Pública nº 33**, de 5 de julho de 2017. Aprimoramento do marco legal do setor elétrico: proposta de medidas legais que viabilizem o futuro do setor elétrico com sustentabilidade a longo prazo. Brasília, 2017.
- [145] BRASIL. **Lei nº 10.848**, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica. Brasília, 2004.
- [146] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. **Portaria nº 403**, de 29 de outubro de 2019. Institui o Comitê de Implementação da Modernização do Setor Elétrico Brasília, 2019
- [147] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. **Portaria nº 187**, de 4 de abril de 2019. Instituiu o Grupo de Trabalho que desenvolva propostas de Modernização do Setor Elétrico. Brasília, 2019.
- [148] BRASIL. **Decreto nº 9.612**, de 17 de dezembro de 2018. Dispõe sobre políticas públicas de telecomunicações. Brasília, 2018.
- [149] BRASIL. **Decreto nº 9.854**, de 25 de junho de 2019. Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas. Brasília, 2019.
- [150] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. MCTI. **Câmara das Cidades 4.0**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/camara-cidades>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [151] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. MDR. **Carta Brasileira de Cidades Inteligentes**. Brasília, 2020.
- [152] BRASIL. **Projeto de Lei nº 976**, de 19 de março de 2021. Institui a Política Nacional de Cidades Inteligentes (PNCI). Brasília, 2021.
- [153] BRASIL. **Decreto nº 9.983**, de 22 de agosto de 2019. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling e institui o Comitê Gestor da Estratégia do Building Information Modelling. Brasília, 2019. Publicado em D.O.U.de 23/08/2019.
- [154] BRASIL. **Decreto nº 10.306**, de 2 de abril de 2020. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. Brasília, 2020.
- [155] BRASIL. **Lei nº 13.853**, de 8 de julho de 2019. Altera a Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018, para dispor sobre a proteção de dados pessoais e para criar a Autoridade Nacional de Proteção de Dados; e dá outras providências. Brasília, 2019.
- [156] WIGGINTON, M; J, HARRIES, J. **Intelligent skins**. New York: Architectural Press, 2002.
- [157] HARRISON, A.; LOE, E.; READ, J. **Intelligent buildings in South East Asia**. 1st. ed. Oxfordshire, UK: Taylor & Francis; 2005.
- [158] SO, A.T.P.; WONG, A.C.W.; WONG, K. A new definition of intelligent buildings for Asia. **Facilities**, v. 17, n.12/13, p. 485-491, 1999. DOI:10.1108/02632779910293488.
- [159] DEWG, Technibank. The European Intelligent Building Group. **The intelligent building in Europe**. A multi-client study by DEWG (London), Technibank (Milan), The European Intelligent Building Group, 1992.
- [160] BUILDING INTELLIGENCE GROUP. **Intelligent building dictionary: Terminology for smart, integrated, green building design, construction, and management**. San Francisco, CA: Hands-on-Guide, 2007.
- [161] LI, P.; LU, Y.; YAN, D.; XIAO, J.; WU, H. Scientometric mapping of smart building research: Towards a framework of human-cyber-physical system (HCPS). **Automation in Construction**, v.129, article ID 103776, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103776.
- [162] EINI, R.; LINKOUS, L.; ZOHRABI, N.; ABDELWAHED, S. Smart building management system: Performance specifications and design requirements. **Journal of Building Engineering**, v.39, article ID 102222, 2021. DOI: 10.1016/J.Jobe.2021.102222.
- [163] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. BMWi. **Rolle der digitalisierung im gebäudebereich. Anhang II** - Ergebnisse im Arbeitspaket 2: Analyse von Hemmnissen/Lücken und Türoffnern. Disponível em: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/rolle-der-digitalisierung-im-gebaeudebereich-anhang-ii.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Acesso em: 04 out. 2021.
- [164] CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Medidores inteligentes e gestão energética operacional**. 2014. Disponível em: CBCS_CTenergia_Benchmarking_DECs.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.

- [165] VERMA, P.; SAVICKAS, R.; STRÜKER, J.; BUETTNER, S.; KJELSDEN, O.; WANG, X. **Digitalization: enabling the new phase of energy efficiency**. 2020. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2020-12/GEEE-7.2020.INF_3.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [166] MARTÍNEZ, I.; ZALBA, B.; TRILLO-LADO, R.; BLANCO, T.; CAMBRA, D.; CASAS, R. Internet of things (IoT) as sustainable development goals (SDG): Enabling technology towards smart readiness indicators (SRI) for university buildings. **Sustainability**, v.13, article ID 7647, 2021. DOI: 10.3390/su13147647.
- [167] DE GROOTE, M.; LEFEVER, M. **Driving transformational change in the construction value chain: Reaching the untapped potential**. Brussels: Buildings Performance Institute Europe. BPIE, 2016. Disponível em: <https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2016/01/DrivingTransformationalChangeCVC2016.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [169] BUCKLEY, N.; MILLS, G.; REINHART, C.; BERZOLLA, Z.M. Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union's Green Deal: Case study of Dublin Ireland. **Energy and Buildings**, v. 247, article ID 111115, 2021, DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111115.
- [169] TORK, L. D.; TIBIRIÇÁ, A. C. G.; TIBIRIÇÁ, Á. M. B. Análise da ventilação natural conforme planos diretores: resultados de pesquisa em Belém, PA. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 329-351, jan./mar. 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100138.
- [170] FRANKE, J. **Recommendations of the COST action C14 on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. In: The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006), p. 529—532, Yokohama, 2006. DOI:10.1.1.461.3813.
- [171] TOPARLAR, Y. et al. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. **Building and Environment**, v. 83, p.79-90, 2015. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.08.004.
- [172] BARANDER, H.; ALMEIDA, M.C.T.S.; MORAES, R. **Planejamento e controle ambiental-urbano e a eficiência energética - Guia Técnico Procel Edifica**. Rio de Janeiro: IBAM/DUMA; ELETROBRAS/PROCEL, 2013. Disponível em: https://www.ibam.org.br/media/arquivos/estudos/guia_planejamento_urbano.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [173] REINHART, C.; DOGAN, T.; JAKUBIEC, J.; RAKHA, T.; SANG, A. **UMI - An urban simulation environment for building energy use, day lighting and walk ability**. In: Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013. Disponível em: https://www.aivc.org/sites/default/files/p_1404.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [174] MICHAEL, A.; HERACLEOUS, C.; THRAVALOU, S.; PHILOKYPROU, M. Lighting performance of urban vernacular architecture in the East-Mediterranean area: Field study and simulation analysis. **Indoor and Built Environment**, v.26, n.4, p. 471-487, 2015. DOI: 10.1177/1420326X15621613
- [175] UMI - Urban Modeling. **Site institucional**. Disponível em: <http://www.UrbanModeling.net>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [176] OPENLCA. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.openlca.org/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [177] CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Avaliação da contribuição de medidores inteligentes para melhorar o padrão de etiquetagem energética e incentivar eficiência**. Produto 2. Metodologia para mensurar e avaliar o impacto do uso de medidores inteligentes (*smart meters*) em edifícios. São Paulo: CBCS, 2014.
- [178] ELAGIRY, M.; DUGUE, A.; COSTA, A.; DECORME, R. Digitalization tools for energy-efficient renovations. **Proceedings 2020**, v.65, n.9, 2021. DOI:10.3390/proceedings2020065009.
- [179] SEPASGOZAR, S.M.E.; HUI, F.K.P.; SHIROWZHAN, S.; FOROOZANFAR, M.; YANG, L.; AYE, L. Lean practices using Building Information Modeling (BIM) and digital twinning for sustainable construction. **Sustainability**, v. 13, article ID 16, 2021. DOI: 10.3390/su13010161.
- [180] ONUMANYI, A.J.; ABU-MAHFOUZ, A.M.; HANCKE, G.P. Low power wide area network, cognitive radio and the internet of things: Potentials for integration. **Sensors**, v.20, n. 23, article ID 6837, 2020. DOI:10.3390/s20236837.
- [181] SAMSUNG. **Lava e Seca Samsung QDrive Smart**. Disponível em: <https://www.samsung.com/br/washers-and-dryers/washer-dryer-combo/front-load-10-2kg-plus-6kg-inox-wd10n64fooxfaz/>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [182] GENERAL ELECTRIC. **GE Smart Portable Air Conditioner**. Disponível em: <https://www.walmart.com/ip/GE-Appliances-10-500-BTU-14-000-BTU-Ashrae-Smart-Portable-Air-Conditioner-with-Dehumidifier-and-Remote-Grey/271161681>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [183] EUROPEAN COMMISSION. **Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings**. 2018. Disponível em: https://smartreadinessindicator.eu/sites/smartreadinessindicator.eu/files/sri_1st_technical_study_-_final_report.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [184] EUROPEAN COMMISSION. **Impact assessment study on downstream flexibility, price flexibility, demand response & smart metering**. Final Report. Request Number: ENER/B3/2015-641, 2016. Disponível em: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/demand_response_ia_study_final_report_12-08-2016.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [185] EUROPEAN COMMISSION. **Construction skills - Equipping building professionals with new skills to achieve European energy targets**. Brussels: European Commission, 2019. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/73fde71a-25fb-11ea-af81-01aa75ed71a1>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [186] YANG, T.; CLEMENTS-CROOME, D.J.; MARSON, M. **Building energy management systems**. In: ABRAHAM, M. (Ed.) *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, p. 291-309, 2017. DOI:10.1016/B978-0-12-409548-9.10199-X.
- [187] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Energy as a service: innovation landscape brief**. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
- [188] KAGAN, N. et al. **Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2013.
- [189] SANTOS, M.C. **Aceitabilidade social de medidores inteligentes: um estudo de caso no Brasil**. Florianópolis, 2018, 207 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [190] ROGOZINSKI, M.; CALILI, R. F. Smart Grid Security Applied to the Brazilian Scenario: A Visual Approach. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n.3, 2021.
- [191] HSIA, S.C.; WANG, S-H.; HSU, S-W. Smart water-meter wireless transmission system for smart cities. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, v. 10, n. 6, p. 83-88, 2021.
- [192] ČULIĆ, A.; SANDRO NIŽETIĆ, S.; ŠOLIĆ, S.; PERKOVIĆ, T.; ČONGRADAC, V. Smart monitoring technologies for personal thermal comfort: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, article ID127685, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127685.
- [193] BAEDEKER, C.; PIWOWAR, J.; THEMANN, P.; GRINEWITSCHUS, V.; KRISEMENDT, B.; LEPPER, K.; ZIMMER, C.; VON GEIBLER, J. Interactive design to encourage energy efficiency in offices: developing and testing a user-centered building management system based on a living lab approach. **Sustainability**, v.12, article ID 6956, 2020. DOI: 10.3390/su12176956.
- [194] HOY, M. B. Alexa, Siri, Cortana, and More: An introduction to voice assistants. **Medical Reference Services Quarterly**, v. 37, n.1, p. 81-88, 2018. DOI: 10.1080/02763869.2018.1404391.
- [195] CASTRO, R.C.C et al. **IntelliPlugs: IoT-based smart plug for energy monitoring and control through wifi and GSM**. In: Proceedings of the 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), 2020, p. 1-4. DOI:10.1109/HNICEM51456.2020.9400116.
- [196] BROWN, M.A.; ZHOU, S.; AHMADI, M. Smart grid governance: An international review of evolving policy issues and innovations. **WIREs Energy Environment**, v.7, n. e-290, 2018. DOI: 10.1002/wene.290.
- [197] SCHIAVO, F.T.; CALILI, R.F.; DE MAGALHÃES, C.F.; FRÓES, I.C.G. The meaning of electric cars in the context of sustainable transition in Brazil. **Sustainability**, v.13, article ID 11073, 2021. DOI:10.3390/su131911073.
- [198] YEVU, S. K.; YU, A. T.W.; DARKO, A. Digitalization of construction supply chain and procurement in the built environment: Emerging technologies and opportunities for sustainable processes. **Journal of Cleaner Production**, v.322, article ID 129093, 2021. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.129093.
- [199] NEVES, L. P.; PRATA, G. A. **Blockchain contributions for the climate finance: introducing a debate**. Rio de Janeiro: FGV, International Intelligence Unit, 2018.

- [200] CALILI, R. F. **Desenvolvimento de sistema para detecção de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro, 157p., 2005 - Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [201] LIMBERGER, M.A. **Estudo da tarifa branca para a classe residencial pela medição de consumo de energia e de pesquisa de posses e hábitos**. Rio de Janeiro, 162p. 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [202] MUTULE, A. et al. Implementing smart city technologies to inspire change in consumer energy behaviour. **Energies**, v.14, article ID 4310, 2021. DOI: 10.3390/en14144310.
- [203] PARLAMENTO EUROPEU. **Directiva 2009/72/CE**, de 13 de Julho de 2009. Estabelece regras comuns para o mercado interno da electricidade e revoga a Directiva 2003/54/CE. Bruxelas, 2009. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-PT/TXT/?from=EN&uri=CELEX%3A32009L0072>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [204] EUROPEAN COMMISSION. **Benchmarking smart metering deployment in the EU-28**: Final Report. Brussels: European Commission, 2020.
- [205] COMISSÃO EUROPEIA. 2012/148/UE: **Recomendação da Comissão, de 9 de março de 2012, sobre os preparativos para a implantação de sistemas de contador inteligente**. Bruxelas: Comissão Europeia, 2012. Disponível em: <https://op.europa.eu/ga/publication-detail/-/publication/a5daa8c6-8f11-4e5e-9634-3f224af571a6/language-pt>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [206] UNITED STATES CONGRESS. **Energy Independence and Security Act**: To move the United States toward greater energy independence and security. Washington D. C.: United States Congress, 2009.
- [207] STATISTA. **Number of electric smart meters deployed in the United States from 2008 to 2019**. 2021. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/676472/number-of-smart-meter-installations-in-the-united-states>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [208] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Empowering cities for a net zero future**: Unlocking resilient, smart, sustainable urban energy systems. Paris: IEA, 2021.
- [209] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **PBE EDIFICA - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R)**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2021. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/nova-ini/inir>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [210] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **PBE EDIFICA - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2021. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/inic>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [211] EDGE. **Site institucional**. Disponível em: <https://edgebuildings.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [212] BREEAM IN USE V6. **Site institucional**. Disponível em: <https://breeaminuse.breeam.com/Home/Welcome#1>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [213] WELL V2. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.wellcertified.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [214] CAIXA ECONOMICA FEDERAL. **Guia Selo Casa Azul + Caixa**. Disponível em: https://www.caixa.gov.br/Downloads/selo_casa_azul/guia-selo-casa-azul-caixa.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [215] GREENBUILDING COUNCIL BRASIL **Certificação LEED**. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [216] FUNDAÇÃO VANZOLINI. **ACQUA-HQE**. Disponível em: <https://vanzolini.org.br/produto/aqua-hqe/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [217] DGNB System. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.dgnb.de/en/>. Acesso em: 04 out. 2021. Acesso em: 04 out. 2021.
- [218] PBE EDIFICA. WebPrescritivo (PBE Edifica). **Site institucional**. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/comercial/webprescritivo>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [219] ARC Skoru. **Site institucional**. Disponível em: <https://arcskoru.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.

- [220] LEED. **Leed Online**. Disponível em: <https://www.leedonline.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [221] ANDROUTSOPOULOS, A.; BOLOLIA, M.; POLYCHRONI, E.; URBANZ, T.; MAIA, I. **Energy Performance Certificates (EPCs) potential linkage with digital building logbooks and building renovation passports**. Disponível em: <https://www.epanacea.eu>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [222] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17021-1:2016** - Avaliação da conformidade - Requisitos para organismos que fornecem auditoria e certificação de sistemas de gestão. Parte 1: Requisitos. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=355893>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [223] INTERNATIONAL ACCREDITATION FORUM. **IAF MD 4:2018** - Mandatory document for the use of information and communication technology (ICT) for auditing/assessment purposes – Issue 2. IAL Inc., 2018. Disponível em: https://iaf.nu/iaf_system/uploads/documents/IAF_MD4_Issue_2_Version_2_03082021.pdf. Acesso em: 04 out. 2021.
- [224] BLUEPRINT. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.carbondescent.org.uk/our-software/blueprint>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [225] BUILDEE. **Site institucional**. Disponível em: <https://buildee.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [226] TREAT. **Energy Audit Software**. Disponível em: <https://psdconsulting.com/Software/treat/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [227] MIPU. **The Energy Audit**. Disponível em: <https://mipu.eu/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [228] OPTIMISER Energy. **Site institucional**. Disponível em: <https://optimiserenergy.com/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [229] WEATHERIZATION ASSISTANT. **Site institucional**. Disponível em: <https://weatherization.ornl.gov/softwaredescription/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [230] PARLAMENTO EUROPEU. **Directiva 2010/31/CE**, de 19 de Maio de 2010. Referente ao desempenho energético dos edifícios. Bruxelas, 2010. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [231] LS3D Projetos. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.ls3dprojetos.com.br/escaneamento-a-laser.htm>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [232] BRTech3D. **Site institucional**. Disponível em: <https://www.brtech3d.com.br/escaneamento-tridimensional-laser>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [233] TEIVA. **Site institucional**. Disponível em: <https://teiva.com.br/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [234] CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Plataforma de cálculo de benchmarking**. Disponível em: <http://benchmarkingenergia.cbcs.org.br/>. Acesso em: 04 out. 2021.

Apêndice 1 – Nota metodológica

Apresenta-se neste primeiro apêndice a metodologia geral adotada neste estudo [1]. Compreende três fases principais:

- i. Fase exploratória/descritiva;
- ii. Fase prospectiva;
- iii. Fase propositiva.

A seguir, detalham-se as atividades em cada fase de execução do estudo.

A1. Fase exploratória/descritiva

Inicialmente, foram realizadas pesquisa bibliográfica e análise documental sobre os temas centrais do estudo, i.e., digitalização e eficiência energética no segmento de edificações. A pesquisa bibliográfica foi conduzida mediante busca de documentos nas bases de dados Scopus, Web of Science, Science Direct, Engineering Village e Google Scholar, cobrindo o período de 2010 a 2021. Uma vez selecionados os documentos de interesse para o estudo, empregou-se a técnica de análise de conteúdo para a metanálise dos documentos e síntese da revisão bibliográfica [2].

Além da pesquisa bibliográfica, realizou-se a análise detalhada de documentos técnicos e normativos, como relatórios de agências internacionais, regionais ou nacionais, normas e regulamentos técnicos aplicáveis, dentre outros, mediante busca em sites institucionais e identificação de referências citadas nas publicações científicas e documentos de referência. Foram objetos da análise documental:

- i. Panorama de experiências internacionais na implementação de mecanismos e estratégias de penetração sustentada de edificações inteligentes;
- ii. Descrição da situação atual da digitalização no segmento de edificações no Brasil, incluindo políticas públicas e instrumentos implementados ou em desenvolvimento;
- iii. Descrição da situação atual das políticas públicas de eficiência energética no Brasil, ou seja, instrumentos implementados ou em desenvolvimento.

A revisão bibliográfica e a análise documental fundamentaram o mapeamento de soluções digitais existentes, distinguindo-se as soluções para cada fase do ciclo de vida (projeto, construção, operação e reforma e demolição) e por tipologia de edificações (comerciais, públicas e residenciais, as habitações de interesse social). Para este mapeamento, optou-se pelo emprego da técnica de análise morfológica [3; 4]. A premissa básica da escolha dessa técnica foi que um problema complexo, como o abordado neste estudo, pode ser decomposto em variáveis, que passam por uma análise sistemática dos estados possíveis que essas possam assumir, gerando assim, um conjunto de estados ou valores referentes a elas. A lógica da decomposição do problema é lidar com questões menos complexas do que o sistema original, possibilitando, desse modo, uma análise mais profunda das partes (neste estudo, subsistemas com indicação de soluções digitais por fase do ciclo de vida das edificações).

A análise morfológica é uma técnica analítico-combinatória, que se baseia na decomposição de um problema, ou objeto de análise, em seus atributos. Zwicky [3] propôs a aplicação dessa técnica em cinco passos:

- i. Formulação e definição do problema (questão que se deseja responder);
- ii. Identificação e caracterização de todas as variáveis do problema;
- iii. Construção de uma matriz multidimensional, preenchida com os possíveis estados que cada variável poderá assumir;
- iv. Identificação de combinações plausíveis dos estados gerados para cada variável, em função da questão que se pretende responder;
- v. Análise das alternativas com descarte daquelas intrinsecamente inconsistentes, insustentáveis ou economicamente inviáveis.

Com emprego desta técnica, foi possível a construção de cinco matrizes morfológicas multidimensionais, uma para cada fase do ciclo de vida da edificação (projeto, construção, operação, reforma e demolição), com definição de sete domínios (envoltória; AVAC; iluminação; aquecimento de água; equipamentos, cargas de tomada; infraestrutura predial; e fornecimento, geração e armazenamento de energia) e cinco tipologias de edificações (comerciais e serviços, públicas e residenciais –

unifamiliares, multifamiliares e habitações de interesse social - HIS).

Os domínios e as tipologias de edificações foram definidos com base na revisão da literatura e análise documental, tendo sido validados posteriormente por representantes da GIZ e do MME. Assim, formataram-se as cinco matrizes, como ilustrado na Figura 4.

Para cada uma das cinco matrizes (projeto, construção, operação, reforma e demolição), foram geradas combinações plausíveis de soluções digitais existentes por tipo de edificação (comerciais e serviços, públicas e residenciais – multifamiliares, unifamiliares e habitações de interesse social). As combinações intrinsecamente inconsistentes, insustentáveis ou economicamente inviáveis foram descartadas. Consolidaram-se, assim, cinco matrizes morfológicas multidimensionais (uma por fase do ciclo de vida), que foram preenchidas com as combinações de soluções digitais existentes aplicáveis a cada tipologia de edificação (matrizes preenchidas são apresentadas na seção 2.1 do Capítulo 2 deste relatório).

Especificamente em relação aos demais tópicos dos Capítulos 2 e 3 do Relatório Preliminar, as questões foram tratadas de forma textual e as análises foram conduzidas com base nos resultados da revisão bibliográfica e documental com emprego da análise de conteúdo, conforme proposta por Bardin [2].

A partir dos resultados da fase exploratória/descritiva, elaborou-se a primeira versão do Relatório Preliminar, que

deverá ser revista com base nos comentários e recomendações do MME, MDR e GIZ. Após a consolidação da revisão, com comentários e recomendações da GIZ, encaminha-se a versão final do Relatório Preliminar.

A seguir, descrevem-se as atividades previstas para as fases prospectiva e propositiva, respectivamente.

A2. Fase prospectiva

Para fins do desenvolvimento desta fase, define-se cenário prospectivo como um conjunto coerente de hipóteses que descrevem uma situação futura e o encaminhamento dos acontecimentos que permitem passar da situação de origem a essa situação futura. O jogo de hipóteses de um cenário deve preencher simultaneamente cinco condições: pertinência, coerência, verossimilhança, importância e transparência [4;5].

Prevê-se nesta fase a construção de cenários prospectivos alternativos, referentes às questões principais do estudo relativas à penetração de edifícios eficientes e o potencial de eficiência energética no segmento de edificações no Brasil, considerando diferentes níveis de digitalização.

Para responder essa questão, será empregada uma abordagem metodológica mista para construção de cenários prospectivos alternativos, que combina a metodologia da Global Business Network [6] com ferramentas propostas por Godet [4;5].

Fase do ciclo de vida da edificação					
Domínios	Tipologias				
	Comerciais e Serviços	Públicas	Residenciais HIS	Residenciais Multifamiliares	Residenciais Unifamiliares
Envoltória	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
AVAC	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
Iluminação	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
Aquecimento de água	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
Equipamentos, cargas de tomada	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
Infraestrutura predial	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais
Fornecimento, geração e armazenamento de energia	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais	Soluções digitais

Figura 4 – Representação de uma matriz morfológica multidimensional aplicável a cada fase do ciclo de vida da edificação.
Fonte: Elaboração própria.

Essa abordagem consiste de sete etapas descritas a seguir:

- i.** Determinação do escopo de análise e horizonte temporal para a construção dos cenários;
- ii.** Definição das variáveis fundamentais mediante o emprego de análise estrutural e da ferramenta MICMAC, disponibilizada no site institucional “La Prospective” [7];
- iii.** Identificação dos principais atores, interessados e influenciadores, dos cenários;
- iv.** Análise do contexto brasileiro em relação à questão principal, descrição da situação de origem e identificação dos condicionantes de futuro no horizonte considerado. Além dos resultados da pesquisa documental a ser realizada na fase exploratória/descritiva, poderão ser conduzidas algumas entrevistas semiestruturadas com representantes de instituições do setor, programas governamentais, associações de classe relacionadas à construção civil e à automação predial, além de instituições de C&T, visando buscar opiniões sobre penetração, barreiras aos edifícios eficientes e impacto das tecnologias digitais na mensuração da eficiência energética, bem como definir premissas para a cenarização pretendida. O roteiro das entrevistas poderá ser validado previamente com a GIZ. Após estas entrevistas individuais, um formulário online será elaborado para permitir coletar informações de número maior de especialistas. A lista de entrevistados individualmente e por formulário receberá indicações do MME e GIZ.
- v.** Construção dos cenários prospectivos alternativos, baseada em matrizes morfológicas multidimensionais, e definição das premissas para estabelecer configurações futuras plausíveis do potencial de eficiência energética no segmento de edificações no Brasil, considerando diferentes velocidades de digitalização. Será usada a ferramenta MORPHOL, disponibilizada no site institucional “La Prospective” [7];
- vi.** Definição das lógicas dos três cenários mais prováveis de penetração no Brasil de edificações eficientes com emprego de tecnologias digitais nas etapas do seu ciclo de vida, no horizonte considerado. Esses cenários serão escolhidos em conjunto com representantes da GIZ e do MME e, a partir desta definição, serão narradas as trajetórias das variáveis fundamentais ao longo do período em questão e definidos requisitos para uma implementação bem-sucedida no Brasil, incluindo requisitos técnicos, legais ou normativos relativos ao fornecimento de dados pelos consumidores de energia;
- vii.** Verificação da consistência e plausibilidade dos três cenários, realizando-se testes de consistência e ajustes, caso se façam necessários, bem como a análise dos interesses dos principais atores e influenciadores em cada cenário, para a qual será usada a ferramenta MACTOR, i.e., “Matriz de Alianças e Conflitos: Táticas, Objetivos e Recomendações”, disponibilizada no site institucional “La Prospective” [7].

Prevê-se ainda, nesta fase, a identificação de estudos de caso, detalhando-se a economia de energia devida à implementação de soluções digitais, considerando os três cenários de implementação a serem definidos com representantes da GIZ e do MME. Caso o conjunto de informações não seja suficiente para identificação de estudos de caso no Brasil, sugere-se a transferência deste tópico para fase propositiva.

A3. Fase propositiva

Após a descrição dos três cenários mais prováveis, faz-se necessário voltar à questão principal e verificar as possíveis implicações para formulação de políticas públicas em cada cenário, voltadas para o aumento da eficiência energética no segmento de edificações no Brasil, considerando diferentes níveis de digitalização. Particularmente, o emprego da ferramenta MACTOR e a análise dos condicionantes do futuro na fase prospectiva permitirão investigar os propósitos estratégicos dos atores envolvidos nesta questão e identificar as forças-motrizas que moldarão as trajetórias em cada cenário.

Para a formulação das recomendações para futuros passos, prevê-se a realização de um webinar para validar os resultados e conclusões do estudo, na perspectiva da implementação de políticas públicas e estratégias associadas aos cenários de penetração sustentada das tecnologias digitais nas edificações no Brasil.

As etapas previstas para a finalização do Relatório Final são:

- i.** Elaboração e entrega da primeira minuta do Relatório Final;
- ii.** Revisão da minuta do Relatório Final, visando incorporar os comentários e contribuições da equipe da GIZ;
- iii.** Entrega do Relatório Final, após a revisão e incorporação dos comentários e contribuições das equipes da GIZ e do MME.

Cabe destacar que ao longo da execução das fases prospectiva e propositiva, prevê-se o agendamento de reuniões periódicas para acompanhamento do projeto e tomada de decisões entre MME/GIZ/Growing Energy.

Referências do Apêndice 1

- [1] GIZ. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. **Termo de referência para realização de estudo sobre Digitalização e Eficiência Energética no setor de edificações no Brasil**. Parcerias Energéticas PN: 18.9022.7-005.00. Brasília: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. GIZ. Parceria Energética Brasil-Alemanha, junho de 2021.
- [2] BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- [3] ZWICKY, F. **Discovery, invention, research through the morphological approach**. New York: Macmillan Publishers, 1969.
- [4] GODET, M. **Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à ação**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1993.
- [5] GODET, M. **A caixa de ferramentas da prospectiva estratégica: problemas e métodos**. Lisboa: Caderno do Centro de Estudos de Prospectiva e Estratégia, nº 5, 2000.
- [6] SCHWARTZ, P. **Scenario planning: Managing for the future**. West Sussex, England, 1998.
- [7] LA PROSPECTIVE. **Site institucional**. Disponível em: <http://en.lapropective.fr/>. Acesso em: 04 out. 2021.

Apêndice 2 – Definição das tipologias de edificações

O Termo de Referência do Projeto prevê a análise de soluções e aplicações digitais **para cada tipologia de edificações (residenciais - em relação a diferentes segmentos do mercado - comerciais e públicas)** [1].

Na reunião de apresentação do Plano de Trabalho (Produto 1 do Contrato), realizada no dia 02/09/2021, entre MME/GIZ/Growing Energy, ficou definido que não se entrará em especificidades de cada tipologia para os setores comercial e público. Para o setor residencial, propõe-se a seguinte estratificação: Habitação de interesse social, Edificação residencial unifamiliar e Edificação residencial multifamiliar.

Esta proposta de subdivisão, em poucas categorias e de uma forma mais ampla, atenderá de maneira eficaz o desenvolvimento do estudo e pode ser confirmada por meio de pesquisa bibliográfica inicial que foi realizada nas principais bases de referência habitacional do país, cujo extrato é apresentado a seguir.

Foram analisadas 11 referências nacionais e 4 internacionais. Verifica-se que há um descasamento das classificações empregadas nos documentos, tanto da parte da construção civil / setor imobiliário como em relação a consumos energéticos (no setor residencial estes se estratificam principalmente em função da classe social, de acordo com a renda familiar), o que dificulta uma análise na perspectiva da temática da digitalização e eficiência energética em edifícios. Parte desse descasamento se refere aos diferentes objetivos dos documentos. De forma complementar e para reforçar a proposta de estratificação que está sendo apresentada, também foram realizadas consultas às plataformas da IEA (*International Energy Agency*) e da Comissão Europeia, bem como selecionados dois estudos alemães, para se ter referências internacionais sobre como é feita a subdivisão do setor residencial em outros países. As referências internacionais foram um balizamento importante pois tem os objetivos mais próximos estipulados no TdR.

Ademais, pela nossa experiência, conclui-se que a discretização das edificações em muitos tipos não irá contribuir, podendo até prejudicar, o alcance do objetivo final do estudo que é o de “oferecer uma base para a formulação de políticas públicas que visam o aumento da eficiência energética do segmento de edificações, através da transformação digital”.

Resumo da pesquisa realizada nas principais bases de referência do Setor Residencial

ABNT NBR 12721 – Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios (2007) [2]

Norma que auxilia o cumprimento da Lei 4.591/64, sobre incorporação imobiliária e condomínios, e apresenta oito quadros com as informações mais importantes do projeto, e que são essenciais para a obtenção do Registro da Incorporação (RI).

Para representar os diferentes tipos de Edificação Residencial, são consideradas as características principais do projeto arquitetônico (tais como número de dormitórios, banheiros, etc.), bem como padrão de acabamento e áreas, ficando a subdivisão como segue:

- Residência unifamiliar (padrão baixo, padrão normal e padrão alto);
- Residência popular (padrão baixo);
- Residência multifamiliar / apartamentos;
 - Projeto de interesse social;
 - Prédio popular (padrão baixo e padrão normal);
 - Residência multifamiliar (padrão baixo, padrão normal e padrão alto).

Disponível em:

<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4743>

ABNT NBR 15.575 – Desempenho de Edificações Habitacionais (2013) [3]

Trouxe para o desenvolvimento de empreendimentos residenciais preocupações com a expectativa de vida útil, o desempenho, a eficiência, a sustentabilidade e a manutenção das edificações. Para isso, agrega em seu conteúdo uma extensa relação de normas já existentes, das mais diversas disciplinas relacionadas ao tema.

É focada no comportamento em uso dos elementos e sistemas do edifício no atendimento dos requisitos dos usuários e não na prescrição de como os sistemas são construídos. Sob essa ótica, é organizada a partir dos elementos do edifício, definindo os requisitos (características qualitativas) aos quais se pretende atender e estabelecendo critérios (grandezas quantitativas) para esse atendimento.

Nesse sentido, não apresenta subdivisão dos tipos de edificações habitacionais.

Disponível em:

<https://www.abntcatalogo.com.br/curs.aspx?ID=157>

CAU/BR – Tabela de honorários de serviços de arquitetura e urbanismo do Brasil (2013) [4]

Elaborado com base no Manual de Procedimentos e Contratação de Serviços de Arquitetura e Urbanismo, aprovado no 138º COSU-IAB/SP, em 2011. As edificações são classificadas em quatro categorias (I, II, III e IV) segundo os critérios: complexidade das pesquisas prévias necessárias à sua projeção, diferenciação funcional, técnica e estética dos espaços e ambientes a serem projetados, sofisticação compositiva da obra, complexidade tecnológica, em especial dos projetos complementares, complexidade do desenvolvimento de detalhamento do projeto, intensidade de participação do cliente no processo projetual.

No item 7.3.1 – Tipologia das edificações, a edificação de uso Habitacional é subdividida em:

- Residencial;
 - Habitação de interesse social;
 - Edifícios de apartamentos, conjuntos habitacionais de casas e/ou Edifícios, condomínios e vila (padrão normal e padrão alto);
 - Residências simples (padrão baixo, padrão médio e padrão elevado).
- Hospedagem;
 - Albergues, pousadas, hotéis simples e motéis;
 - Hotéis de luxo.
- Coletiva;
 - Alojamentos, asilos, orfanatos, internatos, conventos e mosteiros;
 - Quartéis;
 - Presídios e penitenciárias.

Disponível em: <https://honorario.cau.br.gov.br/download/>

PBE EDIFICA - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (2021) [5]

Considera como Edificação Residencial aquela utilizada para fins habitacionais, que contenha espaços destinados ao repouso, alimentação, serviços domésticos e higiene, não podendo haver predominância de atividades como comércio, escolas, associações ou instituições de diversos tipos, prestação de serviços etc. No caso de edificações de uso misto, que possuem ocupação englobando mais de um uso, estes são avaliados separadamente para fins de classificação da eficiência energética.

Subdivide as Edificações Residenciais em:

- Unidade habitacional (UH) - Bem imóvel destinado à moradia e dotado de acesso independente. Corresponde a uma unidade de uma edificação multifamiliar (apartamento) ou a uma edificação unifamiliar (casa);
- Edificação unifamiliar - Edificação que possui uma única unidade habitacional (UH) no lote;
- Edificação multifamiliar - Edificação que possui mais de uma unidade habitacional (UH) em um mesmo lote, em relação de condomínio, podendo configurar edifício de apartamentos, sobrado ou grupamento de edificações. Casas geminadas ou “em fita”, quando situadas no mesmo lote, enquadram-se nesta classificação. Estão excluídos desta categoria hotéis, motéis, pousadas, apart-hotéis e similares.

Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/nova-ini/inir>

PPH/PROCEL – Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (2019) [6]

O principal objetivo é conhecer o comportamento, os hábitos e as características de consumo, além do nível de conhecimento sobre eficiência energética da população brasileira. Tendo como referência o censo de 2010, com abordagem presencial e domiciliar, as entrevistas foram realizadas mediante a aplicação de um questionário voltado para pessoas residentes em domicílios ligados formalmente à rede de distribuição de energia elétrica, nas capitais e nas cidades com 100.000 (cem mil) ou mais domicílios.

Os equipamentos elétricos considerados na pesquisa são: Lâmpadas, Refrigeradores, Condicionadores de Ar, Televisores, Micro-ondas, Máquina de Lavar Roupas, Celular, Modem para internet, Roteador sem fio (Wi-Fi), Receptor de TV por assinatura, Conversor Digital Externo para TV Aberta, Aquecimento de Água. Também houveram perguntas em relação à conscientização / medidas de economia de energia.

A caracterização dos domicílios se apresenta de cinco maneiras, por meio de:

- Estrato Socioeconômico ao qual a família pertence – Classes Sociais de acordo com a renda (Classe A, B1, B2, C1, C2 e D/E);
- Tipo de domicílio (Casa, Apartamento¹ e Outros) – nos mesmos moldes da PNAD;
- Área (em m²) Construída do Domicílio (Média, Mediana, Moda etc.);
- Origem da Energia Elétrica Utilizada no Domicílio (Rede geral de distribuição/Concessionária de Energia Elétrica, Gerada no próprio domicílio, Mista/rede geral de distribuição e gerada no próprio domicílio e Não sabe/não respondeu);
- Média do Consumo Mensal de Energia Elétrica do Domicílio, em kWh, consultado diretamente na conta de energia elétrica apresentada pelo morador do domicílio.

Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>

¹ Na tipologia “Apartamento” é considerado: a localização do domicílio no prédio (térreo, pilotis, último andar...) e se o prédio é exclusivamente residencial ou se tem outra atividade.

Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD Contínua/IBGE (2019) [7]

Tem como finalidade a produção de informações básicas para o estudo do desenvolvimento socioeconômico do País. A PNAD Contínua, implantada em 2011, produz indicadores sobre a força de trabalho e temas suplementares (afazeres domésticos, tecnologia da informação e da comunicação etc.), investigados trimestralmente e acumulados para gerar resultados anuais.

Tem como unidade de investigação o domicílio² que se destina a servir de habitação a uma ou mais pessoas ou que esteja sendo utilizado como tal, definido como local estruturalmente separado (associado à uma limitação espacial de piso, laterais e cobertura que permite que os seus moradores se isolem) e independente (se relaciona às características de acesso, que possibilitam a entrada e saída sem a necessidade de passar por locais de moradia de outras pessoas).

Os domicílios são classificados em particulares (permanentes ou improvisados) ou coletivos, segundo a área de localização (urbano ou rural) e a condição de ocupação (próprio, alugado, cedido ou outra), subdividido nos seguintes tipos:

- Casa;
- Apartamento;
- Habitação em casa de cômodos, cortiço ou cabeça-de-porco.

Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html?=&t=o-que-e>

Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2019) [8]

Utilizam uma outra classificação de consumidores, onde a classe Residencial é subdividida em:

- Baixa Renda (tarifa social);
- Convencional (exceto Baixa Renda).

Esta mesma classificação é adotada no âmbito do PEE ANEEL. De um total de 330 projetos implementados entre período 2009 a 2017, 252 se enquadra na tipologia Baixa Renda e 78 na tipologia Residencial.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> ; <http://www.aneel.gov.br>

BEN – Balanço Energético Nacional (2021) [9]

Apresenta um razoável período de levantamento com uma sistematização consolidada, onde o consumo final energético do país é subdividido em sete setores: industrial, residencial, comercial, público, energético, agropecuário e transporte (sendo que Transporte e Industrial são os únicos que apresentam subdivisões). Esta classificação reflete um tempo onde o consumo em “Edificações” (entendido como um agrupamento das classes Residencial, Comercial e Pública) não era tão representativo (notadamente em energia elétrica) nem tão diverso.

O consumo final energético do Setor Residencial é entendido como a energia consumida em todas as classes sociais (de acordo com a renda), mas não são apresentados os dados desagregados, conforme NOTA TÉCNICA EPE DEA 005/2021 - MANUAL METODOLÓGICO BEN 1ª Edição.

Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>; https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-578/NT.EPE.DEA.SEE.005.2021%20-%20BEN%20Manual%202020_vf.pdf

² Essa definição de domicílio é diferente do conceito de unidade consumidora residencial faturada utilizado pelos agentes de distribuição de energia elétrica no âmbito da Resolução ANEEL N0 414 de 9 de setembro de 2010. Uma das principais diferenças está na possibilidade de serem geradas mais de uma fatura por domicílio dependendo das características elétricas das habitações.

PDE 2030 – Plano Decenal de Expansão de Energia (2021) [10]

Idem BEN (sem desagregar os Consumos Finais) e no Box 2.1 faz referência a PPH/PROCEL [99] e ao MSR - Modelo de Demanda de Energia do Setor Residencial, conforme NOTA TÉCNICA EPE DEA SEE 011/2021.

Utiliza a mesma definição de domicílio do PNAD, sem desagregar por tipologias, e descreve a metodologia desenvolvida para a elaboração das projeções de demanda residencial de energia (dados agregados / modelo econométrico), nos seus usos finais e por classes de renda, a ser utilizada nos estudos da EPE, como o Atlas de Eficiência Energética, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), o Plano Nacional de Energia (PNE) e o Balanço Energético Nacional (BEN).

Esta abordagem por faixas de renda foi iniciada pela eletricidade, tendo como referência o PPH/Procel 2019 (modelagem *bottom-up* de equipamentos elétricos presentes nas residências brasileiras). Para o estudo para as outras fontes energéticas consumidas nos domicílios brasileiros (GLP, gás natural, lenha e carvão vegetal), o MSR usa uma modelagem *top-down* que se baseia nas projeções de Consumo Específico e de Número de Unidades Consumidoras, com base na análise dos microdados das pesquisas POF (Pesquisa de Orçamento Familiar) e PNAD do IBGE relacionados aos energéticos.

As classes de renda familiar adotadas são as seguintes (critério Brasil): Classe I: menos de 2 salários mínimos; Classe II: de 2 a 3 salários mínimos; Classe III: de 3 a 5 salários mínimos; Classe IV: de 5 a 10 salários mínimos; Classe V: mais de 10 salários mínimos.

Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf

PDEf - Plano Decenal de Eficiência Energética, Setor Edificações (2020) [11]

Detalha um conjunto de ações para alcançar os ganhos de eficiência energética estimados para o Brasil no médio prazo, tomando como base os cenários macroeconômicos e de eficiência energética estabelecidos no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE).

Realiza uma discussão sobre os fundamentos e a dinâmica do agrupamento denominado “Edificações”, posto não se caracterizar como classe de consumo energético, sendo um dos desafios para a elaboração de políticas públicas de eficiência energética para este grupo, pois não há uma compreensão dos seus elementos, dificultando a análise de banco de dados e, ainda mais, a compatibilização destes.

Depreende, sem maiores estudos estatísticos, que o consumo de energia residencial é predominantemente dirigido pela ocupação (consumo per capita), enquanto no comercial e serviços o fator preponderante é a área ocupada (consumo específico), o que não é em si uma novidade (ver Tabela 9 – Produto 5).

O PDEf também traz o exemplo da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano da Cidade de São Paulo - SMDU. A Prefeitura de São Paulo é pioneira em termos de apresentação de dados históricos disponíveis (mesmo que com algumas inconsistências) em relação a Edificações. Por meio do sistema Infocidade (https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/licenciamento/desenvolvimento_urbano/dados_estatisticos/info_cidade/), coloca à disposição do público uma extensa compilação de indicadores e informações que compõem o acervo de seu banco de dados. As fontes são as próprias secretarias da prefeitura, mas também instituições como o IBGE, a Fundação Seade e os Ministérios do Trabalho e Emprego, da Educação e da Saúde.

A classificação paulistana das edificações de uso Residencial se subdivide em:

- Residencial Horizontal (Baixo Padrão, Médio Padrão e Alto Padrão);
- Residencial Vertical (Baixo Padrão, Médio Padrão e Alto Padrão).

Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/PlanoDecenalEficienciaEnergetica.aspx>

SINDUSCON/SP - Guia interativo de eficiência energética em edificações (2021) [12]

Neste guia são abordadas cinco tipologias de edifícios que representam da melhor forma as edificações construídas pelos associados do SindusCon-SP. São elas: Prédios residenciais, Casas, Condomínios residenciais, Edifícios de escritórios, Hotéis, Shopping Centers, Retail (varejo) e Logística (centros de distribuição).

Na tipologia Residencial são abordadas as seguintes construções:

- “Casa”, que inclui casas térreas e sobrados;
- “Prédio” que corresponde a edificações com mais de 2 andares;
- “Condomínio”, que são construções com um conjunto de casas ou de edifícios residenciais.

Disponível em:

<https://www.guiaenergiaedificacoes.com.br/tipologias/residencial/>

Referências Internacionais

GIZ/AFD - Programme for Energy Efficiency in Buildings (PEEB) [13]

Em sua publicação “Smart and Efficient – Digital Solutions To Save Energy In Buildings” (2019), não apresenta subdivisão por tipos de edificações.

Disponível em: <http://www.peeb.build>

DENA – Agência Alemã de Energia [14]

Em sua publicação “Rolle der Digitalisierung im Gebäudebereich” (2017), três tipos de edifícios são considerados:

- Casa de uma e duas famílias (EFH / ZFH);
- Edifício de apartamentos de vários andares (GWB);
- Edifício não residencial (NWG).

Disponível em:

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/rolle-der-digitalisierung-im-gebäudebereich.html>

IEA – International Energy Agency [15]

Na sua plataforma, na seção de Uso de Energia em Residências, o consumo final energético residencial é subdividido em quatro tipos:

- Unifamiliar (independente ou geminada);
- Apartamentos (2-4 unidades) e (mais de 5 unidades);
- Casas móveis (trailers).

Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/homes.php>

Directiva 2010/31/EU, sobre o desempenho energético dos edifícios (2018) [16]

Classifica os edifícios nas categorias abaixo, subdividindo o setor residencial em apenas dois tipos:

- Habitações unifamiliares de diversos tipos;
- Edifícios de apartamentos;
- Edifícios de escritórios;
- Estabelecimentos de ensino;
- Hospitais;
- Hotéis e restaurantes;
- Instalações desportivas;
- Edifícios destinados a serviços de comércio grossista e retalhista;
- Outros tipos de edifícios que consomem energia.

Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>

Referências do Apêndice 2

- [1] GIZ. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. **Termo de referência para realização de estudo sobre Digitalização e Eficiência Energética no setor de edificações no Brasil**. Parcerias Energéticas PN: 18.9022.7-005.00. Brasília: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH. GIZ. Parceria Energética Brasil-Alemanha, junho de 2021.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12721:2014 – Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=461383>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1:2021 – Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=477978>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [4] CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL. CAU/BR. **Remuneração do Projeto Arquitetônico de Edificações - Módulo I**. Brasília: CAU/BR, 2013. Disponível em: <https://honorario.cau.br.gov.br/doc/TAB-livro1-final.pdf>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. INMETRO. **PBE EDIFICA - Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R)**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2021. Disponível em: <http://www.pbeedifica.com.br/nova-ini/inir>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [6] ELETROBRAS. PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. PROCEL. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD Contínua**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [8] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [9] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Balço Energético Nacional - BEN 2020**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [10] EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA ENERGÉTICA. EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia (- PDE 2030)**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [11] ELETROBRAS. **Proposta do Plano Decenal de Eficiência Energética (PDEf)**. Contrato nº ECE-DSS-4299/2019-AP- 4508/2020. Janeiro, 2021.
- [12] SINDUSCON/SP. **Guia interativo de eficiência energética em edificações**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.guiaenergiaedificacoes.com.br/>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [13] BINZ, S. et al. **Smart and efficient: Digital solutions to save energy in buildings**. Paris: Programme for Energy Efficiency in Buildings (PEEB) Secretariat, 2019. Disponível em: <https://www.peeb.build/news-events/digital-solutions-report>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [14] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. BMWi. **Rolle der digitalisierung im gebäudebereich. Anhang II - Ergebnisse im Arbeitspaket 2: Analyse von Hemmnissen/Lücken und Türoffnern**. Disponível em: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/rolle-der-digitalisierung-im-gebaeudebereich-anhang-ii.pdf?__blob=publicationFile&v=6. Acesso em: 04 out. 2021.
- [15] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA. **Electricity consumption in U.S. homes**. Washington, 2021. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/homes.php>. Acesso em: 04 out. 2021.
- [16] PARLAMENTO EUROPEU. **Directiva 2010/31/CE**, de 19 de Maio de 2010. Referente ao desempenho energético dos edifícios. Bruxelas, 2010. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021>. Acesso em: 04 out. 2021.

Apêndice 4 – Referências para consolidação do *status quo* de disponibilidade comercial

ENERGYPLUS. **Software para simulação computacional em BEM.** Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 11 out. 2021.

PUC-PR. **Software para simulação computacional em BEM.** <http://domus.pucpr.br/>. Acesso em: 11 out. 2021.

DIAL. **Software para simulação de desempenho luminoso.** Disponível em: <https://www.dial.de/en/dialux/>. Acesso em: 11 out. 2021.

RADIANCE. **Software para simulação de desempenho luminoso.** Disponível em: <https://www.radiance-online.org/>. Acesso em: 11 out. 2021.

TRIMBLE. **Software para simulação computacional em BEM.** Disponível em: <https://www.sketchup.com/products/sefaira>. Acesso em: 11 out. 2021.

PVSYST. **Software para simulação computacional em energias renováveis.** Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 11 out. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. **Aplicação Projeteee-Projetando Edificações Energeticamente Eficientes.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/sobre-o-projeteee/>. Acesso em: 11 out. 2021.

ENEL. **Simulador para simulação de consumo energético residencial.** Disponível em: <https://enel-rj.simuladordeconsumo.com.br/>. Acesso em: 11 out. 2021.

BERKLEY. **Aplicação para dimensionamento em conforto térmico CBE Thermal Comfort Tool.** Disponível em: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>. Acesso em: 11 out. 2021.

UFSC. **Softwares para simulação computacional do labEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações.** Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/Softwares/>. Acesso em: 11 out. 2021.

CITY ENERGY ANALYST (CEA). **Software para simulação computacional de distritos City Energy Analyst.** Disponível em: <https://cityenergyanalyst.com/>. Acesso em: 11 out. 2021.

CITYBES. **Plataforma computacional para modelagem e análise energética de edificações e distritos.** Disponível em: https://citybes.lbl.gov/#citybes_overview. Acesso em: 11 out. 2021.

MIT. **Software Urban Modeling Interface.** Disponível em: <https://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>. Acesso em: 11 out. 2021.

INOVATECH. **Serviços simulação iluminação.** Disponível em: <https://inovatech engenharia.com.br/atuacao/simulacao-termica-e-luminica/>. Acesso em: 11 out. 2021.

TAUFLOW. **Serviços simulação computacional em CFD e outros.** Disponível em: <https://taufLOW.com/simulacao-construcao-civil>. Acesso em: 11 out. 2021.

ESSS. **Software para simulação computacional FLUENT (ANSYS).** Disponível em: <https://www.esss.co/blog/aiguasol-utiliza-ansys-fluent-em-projetos-de-ventilacao-e-otimizacao-energetica/>. Acesso em: 11 out. 2021.

SIMSCALE. **Software SIMSCALE.** Disponível em: <https://www.simscale.com/>. Acesso em: 11 out. 2021.

OPENFOAM. **Software para simulação computacional OpenFOAM.** Disponível em: <https://www.openfoam.com/>. Acesso em: 11 out. 2021.

AMAZON. **Catálogo comercial dispositivos inteligentes.** Disponível em: https://www.amazon.com/gp/browse.html?node=6563140011&ref=nav_em_amazon_smart_home_0_2_7_2. Acesso em: 12 out. 2021.

GENERAL ELETRIC. **Catálogo comercial eletrodomésticos inteligentes.** Disponível em: <https://www.geappliances.com/ge/connected-appliances/>. Acesso em: 12 out. 2021.

QUALCOMM. **Catálogo comercial eletrodomésticos inteligentes.** Disponível em: <https://www.qualcomm.com/products/smart-homes/appliances>. Acesso em: 12 out. 2021.

ANSYS. **Softwares para simulação computacional em CFD.** Disponível em: <https://www.ansys.com/products/fluids>. Acesso em: 07 out. 2021.

CREATIVE SOLUTIONS. **Serviços de simulação numérica em CFD**. Disponível em: <https://creative-solutions.eng.br/solucoes/dinamica-de-fluidos/>. Acesso em: 07 out. 2021.

CONSTRUTORA AMPLUS. **Serviços em metodologias ágeis**. Disponível em: <https://www.amplusconstrutora.com.br>. Acesso em: 07 out. 2021.

CHACON ENGENHARIA. **Serviços em BIM**. Disponível em: <https://www.chaconengenharia.com>. Acesso em: 07 out. 2021.

ATLASSIAN. **Serviços em metodologias ágeis**. Disponível em: <https://www.atlassian.com>. Acesso em: 07 out. 2021.

IEB SCHOOL. **Serviços em metodologias ágeis**. Disponível em: <https://www.iebschool.com>. Acesso em: 07 out. 2021.

LS3D PROJETOS. **Serviços em BIM**. Disponível em: <https://www.ls3dprojetos.com.br/escaneamento-a-laser.htm>. Acesso em: 07 out. 2021.

BRTECH 3D. **Serviços em BIM**. Disponível em: <https://www.brtech3d.com.br/escaneamento-tridimensional-laser>. Acesso em: 07 out. 2021.

TEIVA. **Serviços em BIM**. Disponível em: <https://teiva.com.br/>. Acesso em: 07 out. 2021.

THORUS ENGENHARIA. **Serviços em BIM**. Disponível em: <https://thorusengenharia.com.br/bim/>. Acesso em: 07 out. 2021.

AUTODESK. **Software para BIM**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>. Acesso em: 07 out. 2021.

IESVE. **Software para BIM**. Disponível em: <https://www.iesve.com/Software>. Acesso em: 07 out. 2021.

AUTODESK. **Software para BIM**. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview?mktvar002=4302471>. Acesso em: 07 out. 2021.

GRAPHISOFT. **Software para BIM**. Disponível em: <https://graphisoft.com/solutions/archicad>. Acesso em: 07 out. 2021.

BENTLEY. **Software para BIM**. Disponível em: <https://www.bentley.com/pt/about-us/news/2017/september/18/aecosim-building-designer-connect-edition>. Acesso em: 07 out. 2021.

TEKLA. **Software para BIM**. Disponível em: <https://www.tekla.com/br/produtos/tekla-structures>. Acesso em: 07 out. 2021.

ALTOQI. **Software para BIM**. Disponível em: https://altoqi.com.br/?gclid=Cj0KCOjwiNSLBhCPARiAKNS4_dzgZLaMbfGjXCRBHt8JMWSAxv0NEy-YSpy1qAt21ReBVueBkGV9ClAu3-EALw_wcB. Acesso em: 07 out. 2021.

DOE2. **Aplicação em BEM**. Disponível em: <https://doe2.com/equest/>. Acesso em: 07 out. 2021.

AUTODESK. **Software para BIM**. Disponível em: <https://gbs.autodesk.com/GBS/>. Acesso em: 07 out. 2021.

DESIGNBUILDER. **Software para BIM e Simulação de desempenho luminoso**. Disponível em: <https://designbuilder.co.uk/>. Acesso em: 07 out. 2021.

LADYBUGTOOLS. **Software para BIM, Simulação de desempenho luminoso e Simulação de energias renováveis**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/honeybee.html>. Acesso em: 07 out. 2021.

BLUECFD. **Software para simulação numérica em CFD**. Disponível em: <http://bluecfid.github.io/Core/>. Acesso em: 07 out. 2021.

LADYBUGTOOLS. **Software para simulação numérica em CFD**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/butterfly.html>. Acesso em: 07 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para gerenciamento de energias renováveis**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/65617-solar-homaya-hybrid-home-system-850/#overview>. Acesso em: 07 out. 2021.

NRCAN. **Software para simulação em energias renováveis**. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>. Acesso em: 07 out. 2021.

DAYSIM. **Software para simulação de desempenho luminoso**. Disponível em: <http://daysim.ning.com/>. Acesso em: 07 out. 2021.

ACVBRASIL. **Software para Avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/Software/simapro>. Acesso em: 07 out. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. IBICT. **Software para Avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Disponível em: <https://acv.ibict.br/eventos/Software-gabi/>. Acesso em: 07 out. 2021.

OPENLCA. **Software para Avaliação do ciclo de vida (ACV)**. Disponível em: <https://www.openlca.org/>. Acesso em: 07 out. 2021.

INOVAHOUSE3D. **Serviços em Impressão 3D**. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/>. Acesso em: 07 out. 2021.

PERI. **Serviços em Impressão 3D**. Disponível em: <https://www.peri.com/en/business-segments/3d-construction-printing.html>. Acesso em: 07 out. 2021.

CYBE. **Serviços em Impressão 3D**. Disponível em: <https://cybe.eu/>. Acesso em: 07 out. 2021.

APIS COR. **Serviços em Impressão 3D**. Disponível em: <https://www.apis-cor.com/>. Acesso em: 07 out. 2021.

XTREEE. **Serviços em Impressão 3D**. Disponível em: <https://xtreee.com/en/>. Acesso em: 07 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para Realidade aumentada**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/64507-ecostruxure-augmented-operator-advisor/>. Acesso em: 07 out. 2021.

GAMMA AR. **Software para Realidade aumentada**. Disponível em: <https://gamma-ar.com/pt/>. Acesso em: 07 out. 2021.

AUGMENT. **Software para Realidade aumentada**. Disponível em: <https://www.augment.com/>. Acesso em: 07 out. 2021.

WIRED. **Equipamento para Realidade aumentada**. Disponível em: <https://www.wired.com/2016/01/daqri-helmet/>. Acesso em: 07 out. 2021.

HOLO GROUP. **Serviços em Realidade aumentada**. Disponível em: <https://holo.group/en/construction/>. Acesso em: 07 out. 2021.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. BNDES. **Serviços com emprego de soluções em Blockchain**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/Tecnologia-Blockchain-promete-tornar-o-uso-de-recursos-publicos-mais-transparente-e-confiavel/>. Acesso em: 07 out. 2021.

GROWTHTECH. **Serviços com emprego de soluções em Blockchain**. Disponível em: https://growthtech.com.br/?gclid=Cj0KCQjwiNSLBhCPARIsAKNS4_epSUIcY7aU-MLP_E-QdfuBKq1xoblFhbXBIaI6Ferx6UNeB3iCmcaAikZEALw_wcB. Acesso em: 07 out. 2021.

IBM. **Serviços com emprego de soluções em Blockchain**. Disponível em: <https://www.ibm.com/blogs/Blockchain/2019/06/using-Blockchain-as-a-project-management-device/>. Acesso em: 07 out. 2021.

DELOITTE. **Serviços com emprego de soluções em Blockchain**. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/lu/en/pages/technology/solution/s/Blockchain-distributed-ledger-technology-stitch-in-time.html>. Acesso em: 07 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para gerenciamento e controle da edificação**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/62111-ecostruxure%E2%84%A2-building-operation/?parent-subcategory-id=1210>. Acesso em: 07 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para gerenciamento e controle da edificação**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/62191-ecostruxure%E2%84%A2-building-expert/?parent-subcategory-id=1210>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para gerenciamento e controle da edificação**. Disponível em: https://www.se.com/br/pt/product-range/6823-andover-continuum/?parent-subcategory-id=1210&subNodId=12144254258pt_BR. Acesso em: 08 out. 2021.

AKITABOX. **Equipamento para gerenciamento e controle da edificação**. Disponível em: <https://home.akitabox.com/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamento para gerenciamento e controle da edificação**. Disponível em: <https://www.se.com/ww/en/product-range/39297330-ecostruxure-building-advisor/?parent-subcategory-id=89159&filter=business-2-building-automation-and-control#overview>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Sensor para gerenciamento da edificação**. Disponível em: https://www.se.com/br/pt/product-range/7756-i-a-series/?parent-subcategory-id=1210&subNodId=12146160859pt_BR. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Sensor para medição de energia**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/63626-powertag/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Sensor e atuador para gerenciamento da edificação**. Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/531-rel%C3%A9s-inteligentes---zelio-logic/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Sensor e atuador para gerenciamento da edificação.** Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/533-controlador-program%C3%A1vel---twido/>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Atuador para automação residencial.** Disponível em: <https://www.amazon.com/SwitchBot-app-controlled-device-mechanically-Midnight/dp/B07B4D9KVX>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Sensor de presença.** Disponível em: <https://www.amazon.com/Philips-Motion-Sensor-Installation-Free-Exclusively/dp/B076MGK22M>. Acesso em: 08 out. 2021.

ABB. **Sensor inteligente para monitoramento de motores elétricos.** Disponível em: <https://new.abb.com/motors-generators/pt/servicos/servicos-avancados/smart-sensor>. Acesso em: 08 out. 2021.

WAGO. **Equipamentos e serviços para DALI.** Disponível em: <https://www.wago.com/br/dali>. Acesso em: 08 out. 2021.

ENCELIUM. **Equipamentos e serviços para DALI.** Disponível em: <https://encelium.com/solutions/>. Acesso em: 08 out. 2021.

NVCUK. **Equipamentos e serviços para DALI.** Disponível em: <https://www.nvcuk.com/>. Acesso em: 08 out. 2021.

HELVAR. **Equipamentos e serviços para DALI.** Disponível em: <https://helvar.com/>. Acesso em: 08 out. 2021.

EXTECHINC. **Equipamentos e serviços para fachadas dinâmicas.** Disponível em: <https://extechinc.com/products/kinetic-wall-dynamic-facade/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SOMFY. **Equipamentos e serviços para fachadas dinâmicas.** Disponível em: <https://www.somfyprojects.me/why-dynamic-solar-shading/dynamic-solar-shading>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Equipamentos para assistentes virtuais.** Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Echo-Dot-3%C2%AA-Gera%C3%A7%C3%A3o-Cor-Preta/dp/B07PDHS11H>. Acesso em: 08 out. 2021.

VICTORVISION. **Displays inteligentes.** Disponível em: <https://victorvision.com.br/produtos/displays-inteligentes/>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Displays inteligentes.** Disponível em: <https://www.amazon.com/echo-show-10/dp/B07VHZ41L8>. Acesso em: 08 out. 2021.

GREENV. **Equipamentos e serviços para carregamento de veículos elétricos.** Disponível em: <https://www.greenv.com.br/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Equipamentos e serviços para carregamento de veículos elétricos.** Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/63506-evlink-smart-wallbox/>. Acesso em: 08 out. 2021.

VOLVO. **Equipamentos e serviços para carregamento de veículos elétricos.** Disponível em: <https://www.volvocars.com/br/porque-volvo/inovacao-humana/eletrificacao/volvo-wallbox>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Smart switches.** Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/531-rel%C3%A9s-inteligentes---zelio-logic/>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Smart switches.** Disponível em: https://www.amazon.com/s?k=smart+switch&i=specialty-aps&sprefix=smart+swi%2Cspecialty-aps%2C226&ref=nb_sb_ss_ts-doa-p_2_9. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Smart switches.** Disponível em: <https://www.amazon.com/Lutron-Wireless-Lighting-P-BDG-PKG1W-Assistant/dp/B07G5V6M6G>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Smart switches.** Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Interruptor-Positivo-Casa-Inteligente-2-000W/dp/B08X4VWJYJ>. Acesso em: 08 out. 2021.

AMAZON. **Smart switches.** Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Sonoff-Interruptor-Inteligente-TX-T0US3C-Funciona/dp/B0849LM5TN>. Acesso em: 08 out. 2021.

SAMSUNG. **Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede.** Disponível em: <https://www.samsung.com/br/washers-and-dryers/washer-dryer-combo/front-load-10-2kg-plus-6kg-inox-wd10n64fooxfaz/>. Acesso em: 08 out. 2021.

GENERAL ELECTRIC. **Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede.** Disponível em: <https://www.lg.com/global/lg-signature/refrigerator>. Acesso em: 08 out. 2021.

WALMART. **Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede.** Disponível em: <https://www.walmart.com/ip/GE-Appliances-10-500-BTU-14-000-BTU-Ashrae-Smart-Portable-Air-Conditioner-with-Dehumidifier-and-Remote-Grey/271161681>. Acesso em: 08 out. 2021.

US APPLIANCE. **Equipamentos eletroeletrônicos inteligentes conectados à rede.** Disponível em: <https://www.us-appliance.com/lfts5552s.html>. Acesso em: 08 out. 2021.

ENELX. **Serviços em Demand Side Response (DSR).** Disponível em: <https://www.enelx.com/br/pt/conteudos/historias/resposta-da-demanda--o-que-e-e-qual-a-importancia-desse-recurso>. Acesso em: 08 out. 2021.

GRIDENERGIA. **Serviços em Demand Side Response (DSR).** Disponível em: <https://gridenergia.com.br/blog/analise-resposta-a-demanda/>. Acesso em: 08 out. 2021.

ENGIE. **Serviços em Demand Side Response (DSR).** Disponível em: <https://www.engie.co.uk/energy-services/demand-side-response/why-demand-side-response/>. Acesso em: 08 out. 2021.

GRIDBEYOND. **Serviços em Demand Side Response (DSR).** Disponível em: <https://gridbeyond.com/demand-side-response-dsr-what-is-it-why-do-it/>. Acesso em: 08 out. 2021.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Serviços de computação em nuvem.** Disponível em: <https://www.se.com/br/pt/product-range/65972-ecostruxure-it-expert/>. Acesso em: 08 out. 2021.

BUILDINGINCLOUD. **Serviços de computação em nuvem.** Disponível em: <https://www.buildingincloud.net/en/>. Acesso em: 08 out. 2021.

AUTODESK. **Serviços de computação em nuvem.** Disponível em: <https://constructionblog.autodesk.com/cloud-based-construction-management/>. Acesso em: 08 out. 2021.

DALI ALLIANCE. **Serviços de automação e DALI.** Disponível em: <https://www.dali-alliance.org/>. Acesso em: 08 out. 2021.

HEC AUTOMAÇÃO. **Serviços de automação e DALI.** Disponível em: <http://www.hecautomacao.com.br/eficienciaenergetica/solucoes/iluminacao.html>. Acesso em: 14 out. 2021.

LIGHTING ANALYSTS. **Software Agi32.** Disponível em: <https://lightinganalysts.com/Software-products/agi32/overview/>. Acesso em: 14 out. 2021.

SOLEMMMA. **Softwares diversos para simulação de iluminação.** Disponível em: <https://www.solemma.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.

CHAM. **Software Phoenix.** Disponível em: <https://www.cham.co.uk/phoenix.php>. Acesso em: 14 out. 2021.

UGREEN. **Serviços simulação iluminação.** Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/consultoria-em-sustentabilidade/>. Acesso em: 14 out. 2021.

CARBONDESCENT. **Software e serviço BluePrint.** Disponível em: <https://www.carbondescent.org.uk/our-Software/blueprint>. Acesso em: 14 out. 2021.

BUILDEE. **Software Buildee.** Disponível em: <https://builddee.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.

EMATPROGRAM. **Software Emat.** Disponível em: <https://www.ematprogram.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.

EDGE. **Aplicações para certificação de edifícios.** Disponível em: <https://edgebuildings.com/>. Acesso em: 14 out. 2021.

REDTEAM. **Sensores e atuadores.** Disponível em: <https://www.redteam.com/site-sensors-and-construction-enhancing-the-jobsite-ecosystem/>. Acesso em: 14 out. 2021.

