

ACELERANDO A MEDIÇÃO INTELIGENTE

DIRETRIZES REGULATÓRIAS PARA A MASSIFICAÇÃO NA AMÉRICA LATINA





EDITORES

Alessandra Amaral, Roberto Cajamarca Gómez,
Joaquín Lazo Sánchez.

COLABORADORES

Emilio Enrique Argüello Muñoz, Edward Arias, Cyro Boccuzzi, Claudio Bulacio, Dimas Carranza, Martín Cruz, José Manuel Da Peña, Valeria d'Ettorre, Alfredo Gallegos González, Yohana Galvis Silva, Martín Lamas Marcos Javier Leyes, Paolo Abeld Quispe Mamani, Ednelson de Moraes, Daniel Alejandro Moreno, Fernando Mosteirín, Daniel Picchi, Jorge Rodríguez Vargas, Juan Pablo Rodríguez Iglesias, Mauricio Rojas, Hans Rother Salazar, Santiago Scarlato, Franchesco Somontes Marin, Mena Testa, Juan Carlos Tripaldi, Eduardo Visintini.

Agradecemos ao nosso parceiro, Cyro Boccuzzi, sócio-diretor da ECOEE, consultoria pioneira em gestão e tecnologias de sistemas inteligentes de energia e fundador e presidente do Fórum Latino-Americano de Smart Grid, por sua valiosa contribuição na revisão do documento.



1. INTRODUÇÃO

5

2. AMI COMO FACILITADOR DO NOVO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO

6

3. PROGRESSO DA IMPLANTAÇÃO DE AMI NA AMÉRICA LATINA

8

- 3.1. Nível de cobertura AMI em BT
- 3.2. Estratégias de implantação

4. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA AMI E DESEMPENHO DA INFRAESTRUTURA

14

- 4.1. Características
- 4.2. Tecnologias de comunicação
- 4.3. Interoperabilidade, padrões e testes de conformidade

5. INTEGRAÇÃO AMI COM SISTEMAS CORPORATIVOS

20

- 5.1. Integração com plataformas corporativas
- 5.2. Análises avançadas baseadas em AMI

6. GOVERNANÇA DE DADOS, CIBERSEGURANÇA E RELAÇÕES COM CONSUMIDORES

23

- 6.1. Acesso do Consumidor às Informações
- 6.2. Cibersegurança aplicada à AMI
- 6.3. Privacidade e tratamento de dados

7. MODELOS ECONÔMICOS, FINANCIAMENTO E RECUPERAÇÃO DE INVESTIMENTOS

26

- 7.1. Propriedade e esquemas de financiamento
- 7.2. Business Case e critérios de avaliação

8. BARREIRAS AO ESCALONAMENTO E CONDIÇÕES HABILITADORAS

30

9. ABORDAGENS REGULATÓRIAS INTERNACIONAIS

35

- 9.1. Tipos de modelos regulatórios e desenho de mercado
- 9.2. Funcionalidades da AMI e tendências internacionais
- 9.3. Boas práticas internacionais e lições para a América Latina

10. REFERÊNCIAS

46

A modernização dos sistemas de distribuição de eletricidade tornou-se um componente central da transição energética, impulsionada pela eletrificação de novos usos, pela expansão da geração distribuída e pela crescente demanda por redes mais eficientes, flexíveis e resilientes. Nesse panorama, a medição inteligente se destaca como um elemento estratégico para melhorar a gestão do sistema elétrico e fortalecer a relação entre distribuidores e consumidores. Sua capacidade de gerar informações detalhadas, melhorar a transparência do serviço e possibilitar novos esquemas de participação fazem da Infraestrutura Avançada de Medição (AMI) um componente fundamental da digitalização do setor.

Embora os potenciais benefícios da AMI sejam amplamente reconhecidos, sua adoção exige superar desafios técnicos, econômicos e regulatórios que condicionam a viabilidade de sua implantação. Isso é especialmente relevante na América Latina, onde os distribuidores enfrentam condições heterogêneas em termos de perdas não técnicas, disponibilidade de investimento, capacidade operacional e estruturas regulatórias em evolução. Ao mesmo tempo, a região tem a oportunidade de incorporar padrões modernos e avançar diretamente para soluções de segunda geração, evitando ciclos intermediários já superados em outros mercados.

Este documento analisa o papel da medição inteligente na transformação dos sistemas de distribuição de eletricidade na América Latina, identificando as condições técnicas, regulatórias, econômicas e operacionais necessárias para avançar para implantações em maior escala. O objetivo é oferecer uma visão abrangente que permita compreender o estado atual da digitalização na região, avaliar seus desafios e oportunidades, e fornecer elementos concretos para o desenho de políticas públicas e estratégias empresariais que facilitem a adoção sustentável da Infraestrutura Avançada de Medição.

O documento está estruturado da seguinte forma: a seção 2 descreve o papel da medição inteligente como facilitadora do novo modelo de distribuição; a seção 3 apresenta o panorama regional da implantação da AMI e das metas nacionais; a seção 4 aborda os aspectos técnicos da infraestrutura, incluindo funcionalidades e comunicações; a seção 5 discute sua integração com os sistemas corporativos; a seção 6 revisa a governança de dados, o papel do consumidor e a cibersegurança; a seção 7 examina modelos econômicos e financeiros; a seção 8 resume as barreiras enfrentadas pela região; por fim, a seção 9 revisa experiências e lições internacionais aplicáveis à América Latina.



A modernização dos sistemas de distribuição de eletricidade tornou-se um componente central da transição energética

AMI COMO FACILITADOR DO NOVO MODELO DE DISTRIBUIÇÃO

A distribuição de eletricidade está passando por uma transformação profunda impulsionada pela eletrificação da demanda, pela expansão da geração distribuída e pela maior variabilidade nos fluxos de energia (IEA, 2023a). Essas condições tornam o modelo passivo tradicional de rede insuficiente e exigem maior visibilidade, capacidades de controle e dados de alta resolução. Nesse contexto, a medição inteligente e, em particular, a Infraestrutura Avançada de Medição (AMI), se consolidam como a base digital que permite o funcionamento de redes mais dinâmicas e descentralizadas, integrando medição, comunicações e gestão de dados no mesmo sistema (IRENA, 2025).

A evolução da medição de energia elétrica reflete essa mudança. A telemetria básica tornou possível melhorar a leitura remota e reduzir processos manuais (IDB, 2023), mas o avanço tecnológico incorporou comunicações bidirecionais, registros em alta frequência e funções de controle, transformando o medidor em um componente de uma infraestrutura digital abrangente. A AMI é o resultado dessa trajetória: uma plataforma que oferece observabilidade em baixa tensão (BT), dados granulares e monitoramento contínuo, elementos essenciais para gerenciar redes com maior complexidade operacional.

Com base nisso, a AMI viabiliza funções estratégicas para o novo modelo de distribuição. Dados de alta frequência permitem identificar perdas, antecipar congestionamento e priorizar reforços. E eles suportam esquemas operacionais avançados como o FLISR (do inglês: Fault Location, Isolation and Service Restoration). Sua capacidade de gerenciar fluxos bidirecionais possibilita a integração de geração residencial fotovoltaica, armazenamento e novos perfis de carga, enquanto a granularidade temporal é fundamental para tarifas horárias, programas de resposta à demanda (Comissão Europeia, 2023) e recarga inteligente de veículos elétricos (IRENA, 2023). Em conjunto, a AMI constitui a infraestrutura digital mínima para operar sistemas com alta penetração de recursos distribuídos e maior variabilidade (IDB, 2023).

Apesar de seu papel central na modernização da distribuição, a implantação da AMI envolve grandes desafios econômicos que sobrecarregam a capacidade financeira das empresas sob os esquemas atuais. A magnitude do esforço é regional: um estudo anterior da ADELAT e GME para sete economias latino-americanas (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Guatemala e Peru) estima que o investimento necessário em infraestrutura AMI ultrapassa US\$ 51,4 bilhões para alcançar uma transição efetiva até 2040 (ADELAT, 2024a). Esse volume de capital, que inclui medidores, comunicações e gestão de dados, é evidência de um trade-off crítico: a tecnologia é indispensável para a eficiência futura, mas seu custo atual é difícil de assumir quando os marcos regulatórios atuais não evoluíram no mesmo ritmo da digitalização (IDB, 2023) e frequentemente privilegiam a infraestrutura física tradicional em detrimento das soluções digitais (IEA, 2023).

O papel do regulador é, portanto, decisivo para tornar essa modernização viável. Uma implantação sustentável baseia-se em mecanismos claros para a recuperação de investimentos, padrões técnicos mínimos e para a realização de uma Análise de Custo-Benefício que orienta decisões e determina o escopo do projeto (IDB, 2023). Sem reconhecimento tari-

fário, incentivos adequados e definições explícitas de custos recuperáveis, o investimento em AMI tende a ser restrito a pilotos isolados. Por essa razão, vários países avançaram em estratégias nacionais que estabelecem objetivos, sequências de implantação e responsabilidades institucionais, alinhando a digitalização com os objetivos de longo prazo do setor elétrico.

Na América Latina, esses desafios são particularmente intensos devido às condições estruturais específicas da região. A persistência de altas perdas não técnicas, heterogeneidade socioeconômica, disponibilidade limitada de capital e disparidade nas capacidades técnicas e financeiras entre distribuidores levaram a um progresso fragmentado e taxas de implantação desiguais. Esses fatores explicam em grande parte por que a penetração da AMI permanece relativamente baixa e por que muitos de seus benefícios ainda não se concretizaram totalmente. Diante disso, é necessário analisar com precisão o estado atual da implantação. A seção a seguir apresenta os níveis de cobertura AMI em BT e as estratégias seguidas pelas distribuidoras, identificando prioridades, abordagens de implantação e os fatores que explicam o progresso e os atrasos na região.



PROGRESSO DA IMPLANTAÇÃO DE AMI NA AMÉRICA LATINA E ESTRATÉGIAS DE IMPLEMENTAÇÃO

NÍVEL DE COBERTURA AMI EM BT

Em escala global, a implantação da AMI avançou significativamente na última década, com mais de 1,2 bilhão de medidores inteligentes instalados (Comissão Europeia, 2023). Europa e América do Norte são responsáveis por grande parte desse desenvolvimento, impulsionadas por mandatos regulatórios e análises de custo-benefício positivo (ACB). Na União Europeia, a implantação da AMI foi sustentada por um arcabouço regulatório construído progressivamente para fornecer clareza sobre objetivos, requisitos mínimos e interoperabilidade. Em conjunto, esse arcabouço regulatório, desenvolvido e aprimorado ao longo de mais de 15 anos, forneceu suporte estável e previsível para incentivar implantações em massa, definindo antecipadamente quando avançar, com quais requisitos mínimos e como gerenciar consistentemente dados críticos e elementos de segurança. Nesse contexto, estima-se que a penetração média atingiu 56% em 2022 (Eurelectric, 2024), e que vários países concluíram a substituição total de seus parques de medição, como Itália, Espanha, Suécia e Finlândia (Comissão Europeia, 2023). Os Estados Unidos ultrapassam 68% de cobertura, enquanto Japão e China caminham para ciclos de segunda geração com dezenas de milhões de equipamentos instalados (Comissão Europeia, 2023). Em contraste com essas trajetórias, a América Latina está em uma fase inicial de adoção, com penetrações geralmente abaixo de 10% e avanços concentrados em um número limitado de países e distribuidoras. Essa lacuna evidencia um ponto de partida desigual e reforça a necessidade de compreender com precisão o estado atual da implantação na região antes de avaliar estratégias regulatórias e modelos de implementação.

Dentro desse panorama regional incipiente, Uruguai, Costa Rica e Honduras estão posicionados como os países com maior progresso em medição inteligente de BT, com níveis de cobertura de 80%, 54% e 23%, respectivamente. Embora compartilhem uma posição de destaque em termos relativos, suas trajetórias seguiram abordagens regulatórias, institucionais e operacionais diferenciadas. O Uruguai implementou uma implantação centralizada desde 2016, liderada por sua empresa estatal e articulada com o planejamento energético nacional. A Costa Rica avançou sob uma estratégia regulatória explícita, com metas definidas para 2028 e uma implantação obrigatória executada em fases geográficas. Honduras, por outro lado, promoveu a adoção de AMI a partir de uma lógica operacional associada à redução de perdas não técnicas, primeiro por meio de um esquema de concessão e, mais recentemente, por meio de intervenções direcionadas do Estado. Esses três casos são referências relevantes para analisar como diferentes estruturas institucionais possibilitaram, com ritmos e objetivos distintos, alcançar níveis de penetração acima da média regional.

Um segundo grupo, composto por Chile, Guatemala, México, Brasil, Colômbia e Equador, apresenta níveis de penetração mais moderados, entre 3% e 9%. No Chile (8,8%), a implantação começou a partir de um mandato regulatório explícito em 2018, mas foi parcialmente revertida após um processo de rejeição social, que levou a uma implantação voluntária e gradual supervisionada pelo regulador. A Guatemala (8,4%) avançou sem uma estratégia nacional formalizada, por meio de iniciativas individuais de distribuidoras voltadas para a eficiência comercial, em um contexto tarifário regulado. O México (6%) concentra o maior volume absoluto

de medidores instalados na região, sob um modelo centralizado executado pela Comisión Federal de Electricidad (CFE), com uma abordagem operacional associada à redução de perdas. O Brasil (5,6%) combina baixa penetração residencial com projetos de grande escala em execução e um processo regulatório voltado para estabelecer diretrizes mínimas em nível federal. Na Colômbia (3,9%), o arcabouço regulatório foi consolidado entre 2018 e 2022 com metas nacionais para 2030, embora a implantação física esteja em estágios iniciais, liderada por distribuidoras baseadas em projetos-piloto urbanos. Na Argentina (3,3%), o progresso corresponde principalmente a projetos-piloto distribuídos territorialmente, enquanto o regulador começa a estruturar um programa de modernização com horizonte de médio prazo. O Equador (3,1%) promoveu intervenções localizadas no âmbito de planos de eficiência energética, incluindo iniciativas recentes em grandes cidades com a participação de distribuidoras públicas regionais. Em conjunto, esses casos ilustram panoramas intermediários onde o progresso da implantação é condicionado por fatores institucionais, sociais ou técnicos que limitam seu ritmo e escopo.

Em um terceiro grupo de países, a medição inteligente está claramente em fase preliminar, com cobertura inferior a 1% e progresso focado em pilotos ou estágios iniciais de modernização. No Peru (1,3%), o desenvolvimento é sustentado por iniciativas específicas apoiadas em um marco regulatório obrigatório, embora a implantação prática ainda seja limitada. O Paraguai (0,5%) mantém uma implantação restrita a pilotos urbanos sem um plano nacional de escalonamento. El Salvador (0,5%) desenvolveu pilotos autorizados pelo regulador com funcionalidades de telemetria e redução de perdas, sem ain-

da ter feito a transição para uma fase massiva. Em conjunto, esses casos mostram uma etapa inicial em que os marcos regulatórios e as experiências de demonstração ainda não se traduziram em avanços significativos em BT.

Um quarto grupo de países ainda está nos estágios iniciais de adoção da AMI, embora com dinâmicas claramente diferenciadas. O Panamá e a República Dominicana iniciaram recentemente os processos de implantação: no Panamá, a adoção começou em 2024–2025, com pilotos urbanos e fases iniciais de telemetria apoiadas por diretrizes regulatórias, enquanto na República Dominicana avança um programa acelerado iniciado em 2024 que incorpora centenas de milhares de medidores inteligentes voltados para reduzir perdas e modernizar a rede. A Nicarágua, por sua vez, desenvolveu um piloto tecnicamente bem-sucedido há uma década, com reduções significativas nas perdas em áreas críticas, mas a iniciativa não foi ampliada devido a restrições de financiamento e prioridades focadas na expansão básica do serviço. Bolívia e Venezuela fizeram progressos muito limitados, sem programas nacionais de medição inteligente e com esforços específicos ou iniciais em um contexto de limitações financeiras, estruturas institucionais fracas e, em alguns casos, deterioração operacional dos sistemas elétricos.

A Figura 1 resume graficamente a comparação regional, onde países que consolidaram implantações em massa, outros que avançam por meio de estratégias parciais ou piloto e um grupo que acaba de iniciar a modernização de seu parque de medição coexistem. Essa diversidade reflete diferentes trajetórias institucionais, níveis de capacidade técnica e graus de prioridade atribuídos à digitalização em cada sistema elétrico.

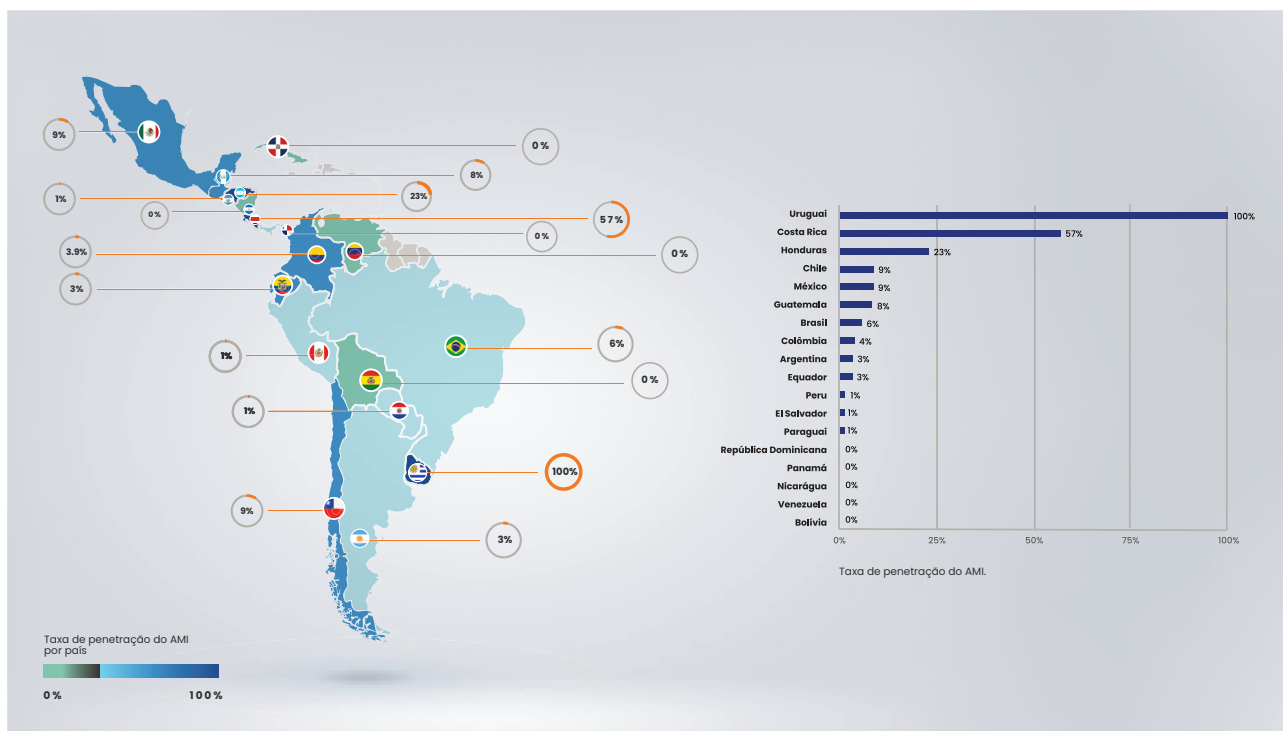


Figura 1. Penetração estimada de medidores inteligentes de BT por país na América Latina e no Caribe (2024).
Fontes: ADELAT (2024b), IDB (2023), Grupo Mercados Energéticos, ICE e comunicados à imprensa.

A análise de escala das distribuidoras que participaram deste estudo e que responderam à pesquisa, mostra que, dentro de cada país, também existem diferenças importantes no grau de progresso da implantação. Destaca-se o caso da Costa Rica, onde o ICE atingiu níveis de penetração acima de 50%, resultado de uma estratégia nacional consistente, financiamento estável e continuidade institucional. Em mercados mais fragmentados, surgem trajetórias diferentes: algumas empresas alcançaram avanços próximos a 20%, enquanto outras permanecem em faixas iniciais de 2% ou menos, mesmo operando sob o mesmo arcabouço regulatório. A Argentina é um claro exemplo dessa dispersão, com concessões que ultrapassam dois dígitos, enquanto outras mal começaram a adotar. Na América Central, a maioria dos distribuidores está entre 1% e 5%, geralmente em fases piloto ou estágios iniciais de implantação, e em sistemas andinos com menos desenvolvimento digital ainda existem empresas sem implementação eficaz de AMI.



ESTRATÉGIAS DE IMPLANTAÇÃO

Na América Latina, a implementação da AMI apresenta abordagens diversas, refletindo prioridades diferenciadas e estruturas estratégicas não homogêneas. Enquanto alguns países formalizaram metas nacionais explícitas com prazos definidos e apoio político, outros avançam por meio de estratégias na fase de projeto, validação piloto ou definições que ainda estão em evolução. Em certos contextos, a implantação responde exclusivamente a iniciativas individuais das distribuidoras, sem uma orientação centralizada. Essas diferenças nos permitem distinguir entre níveis de compromisso institucional e ambição política em torno da digitalização do sistema de distribuição, com implicações concretas na cobertura esperada, na alocação de responsabilidades e no ritmo projetado de implantação. A Tabela 2 resume as principais diretrizes nos países onde atuam as distribuidoras participantes do estudo, incluindo metas oficiais, prazos, abordagens estratégicas, áreas ou segmentos priorizados e o estado atual do progresso.

Costa Rica e Colômbia lideram o grupo de países com metas de cobertura nacional claramente definidas, ancoradas em estratégias regulatórias robustas. A Costa Rica busca alcançar 100% de penetração dos medidores inteligentes até 2028 sob sua Estratégia Nacional para Redes Inteligentes (ENREI), enquanto a Colômbia estabeleceu uma meta de 75% de cobertura até 2030 por meio da regulamentação obrigatória pela CREG. Ambos os casos apresentam roteiros detalhados e critérios segmentados de priorização, bem como mecanismos regulatórios para a recuperação tarifária de investimentos. Em particular, o caso colombiano ilustra uma abordagem de implantação sequencial, na qual uma fase inicial obrigatória reduz as incertezas técnicas e econômicas do sistema, possibilitando uma massificação subsequente condicionada a resultados verificáveis da análise custo-benefício

(CREG, 2025). Por sua vez, Peru e Brasil formularam planos ambiciosos ainda em fase de projeto ou validação. O Peru propõe uma massificação dos medidores inteligentes no horizonte 2025–2035, sujeita à aprovação do Congresso e do regulador OSINERG-MIN. O Brasil, por outro lado, está na fase de consulta pública de um regulamento que estabelece metas mínimas obrigatórias de curto prazo, equivalentes a 4% das unidades de consumo, como prelúdio à massificação condicionada à análise custo-benefício. A proposta está alinhada com um horizonte de digitalização de 10 anos (Portaria Normativa MME nº 111/2025, de 18 de junho de 2025) e considera, como referência de longo prazo, a implantação de cerca de 40% das unidades de BT para consumidores nesse período.

No caso do Equador, El Salvador, Guatemala e Argentina, não há metas nacionais definidas de cobertura ou mandatos regulatórios obrigatórios. A implantação da infraestrutura AMI nesses países é impulsionada quase exclusivamente por decisões corporativas das distribuidoras, seja para modernização operacional, controle de perdas ou preparação para integrar geração distribuída. A Argentina está em uma fase anterior de avaliação tecnológica, com pilotos liderados pela ENRE na Área Metropolitana de Buenos Aires, mas sem um roteiro nacional. Em El Salvador e no Equador, as ações se concentraram em pilotos limitados ou segmentos específicos, como consumidores de alto consumo e autogeradores. A Guatemala, por sua vez, não relatou progresso significativo no nível institucional.

O Chile é um caso único na região. Inicialmente, adotou uma política de substituição massiva e obrigatória dos medidores, protegida pela Lei nº 21.076. No entanto, a falta de aceitação social da transferência de custos para os consumidores gerou forte controvérsia pública, o que levou o governo a reverter o mandato em 2019 e tornar a implantação um processo voluntário. Atu-

almente, a estratégia se limita a reposições padrão, novas conexões ou solicitações individuais, sem um cronograma ou objetivo nacional estabelecido.

Tabela 1. Metas Nacionais e Abordagens Estratégicas para a Implantação de AMI

País	Objetivo nacional de implantação	Prazo oficial	Abordagem Estratégica	Área ou segmentos prioritários	Status Regional de Progresso
Argentina	Não há um objetivo nacional formal.	Sem prazo definido.	Viabilidade técnica e pilotos para pré-qualificar tecnologias.	Áreas urbanas da AMBA.	O Comitê de Estudo foi constituído e a fonte de financiamento foi definida. Massificação condicionada aos resultados do piloto.
Brasil	A MME propôs a meta de instalar medidores inteligentes adicionais em 4% das unidades de consumo de cada distribuidor.	No máximo 12 meses para a instalação de 4% e a apresentação do ACB.	Implantação obrigatória (4%) para quebrar a inércia, com massificação obrigatória se o ACB for positivo.	Áreas contíguas com alto potencial para redução de perdas não técnicas.	Fase regulatória em consulta pública.
Chile	O objetivo nacional voltou a ser não obrigatório.	Mandato original de 7 anos. Agora sem obrigação.	Processo voluntário e substituição por falha.	Prioriza clientes com GD ou que solicitam isso voluntariamente.	Implantação em massa estagnada devido à regulamentação voluntária.
Colômbia	Meta de 75% dos consumidores com AMI.	Até 2030. Fases de 18 e 60 meses.	Implantação progressiva e obrigatória, condicionada ao ACB.	Consumidores de alto consumo e autogeradores.	O arcabouço regulatório avançou após a decisão do Tribunal Constitucional.
Costa Rica	Meta nacional de cobertura 100%.	80% até 2026 e 100% até 2028.	Implantação progressiva em massa.	Cobertura nacional.	Muito progresso. Mais de 50% do parque de medidores.
Equador	Não há um objetivo nacional formal.	Sem prazo definido.	Medição bidirecional obrigatória para GD	Consumidores regulados implementando GD.	Fase de adaptação regulatória e de sistemas após o padrão de 2023.
El Salvador	Não há um objetivo nacional formal.	Sem prazo definido.	Uma estratégia piloto de AMI para validar a tecnologia antes de uma expansão em massa.	Foco na redução de perdas e na gestão da demanda.	Fase piloto com reformas regulatórias em análise.
Guatemala	Não há um objetivo nacional formal.	Sem prazo definido.	Estratégia incipiente, voluntária e funcional, focada em possibilitar tarifas horárias (TOU) e opções pré-pagas	Clientes de alto consumo na Cidade da Guatemala.	Progresso incipiente na fase piloto, sem expansão massiva.
Peru	Projeto de lei propõe implantação nacional.	O plano abrange 2025–2035.	Implantação progressiva baseada em um ACB.	Clientes de alto consumo e GD.	Na fase de planejamento regulatório.



ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA AMI E DESEMPENHO DA INFRAESTRUTURA

A análise dos objetivos nacionais e níveis de penetração mostra que a região está caminhando para a modernização de seus sistemas de medição, mas o sucesso desses processos depende não apenas da escala da implantação, mas também da solidez técnica da infraestrutura instalada. A definição adequada de funcionalidades, a seleção de tecnologias de comunicação de acordo com as condições de cada rede, a existência de padrões e interoperabilidade comprovada são fatores críticos para garantir que os sistemas AMI respondam aos desafios operacionais e regulatórios da América Latina. Esta seção examina esses três elementos estruturais, caracterizando o tipo de funcionalidades incorporadas pelos distribuidores, as tecnologias de comunicação que suportam a transmissão de dados e os mecanismos adotados para garantir interoperabilidade e conformidade técnica em um ambiente com múltiplos fabricantes e arquiteturas, reconhecendo que o pleno aproveitamento dessas capacidades depende de sua articulação com esquemas tarifários compatíveis.

CARACTERÍSTICAS

A implantação de infraestrutura avançada de medição envolve não apenas a instalação de um dispositivo, mas a incorporação de um conjunto de funcionalidades que determinam o nível de observabilidade, controle e valor operacional que o sistema pode oferecer. As funcionalidades relatadas pelos distribuidores pesquisados nos permitem caracterizar o estado tecnológico da região e posicioná-la em linha com as tendências internacionais da medição inteligente. Essa análise é fundamental, pois a capacidade do sistema AMI de gerar dados confiáveis, possibilitar operações remotas, registrar eventos e detectar irregularidades condiciona tanto os benefícios operacionais quanto sua contribuição para a modernização da rede.

A literatura especializada distingue duas etapas na evolução internacional da medição inteligente. A primeira onda, implantada entre meados dos anos 2000 e início dos anos 2010, foi orientada principalmente para a eficiência operacional e teve como recurso central a leitura remota como substituto da

leitura presencial, com comunicações limitadas e um conjunto reduzido de registros. A segunda onda, impulsionada desde a década de 2020, responde à crescente digitalização do sistema elétrico e à integração de recursos distribuídos. Ela é caracterizada por maior granularidade dos dados, comunicações robustas bidirecionais, atualização remota de software, fortalecimento das capacidades de cibersegurança e recursos voltados para operar em uma rede mais dinâmica e descentralizada. Países pioneiros já estão substituindo equipamentos de primeira geração por dispositivos que incorporam processamento de borda e suportam esquemas avançados de gestão ativa de demanda.

A Figura 2 resume a frequência com que as diferentes funcionalidades são reportadas pelas distribuidoras pesquisadas, oferecendo uma primeira aproximação empírica do status tecnológico do parque regional AMI. A partir dessas evidências, observa-se um padrão claramente híbrido. A região não está entrando tardiamente na primeira onda baseada apenas em telemetria, já que

a maioria das empresas declara um conjunto funcional amplo que inclui, em proporção majoritária, registros bidirecionais, medição de energia reativa, curvas de carga e detecção de adulterações. No entanto, também não há uma adoção total das capacidades distintas da segunda onda, como controle remoto operacional amplo, gestão ativa de flexibilidade, granularidade rigorosa orientada para tarifas dinâmicas ou arquiteturas projetadas para a integração sistemática de recursos distribuídos. No geral, a implantação observada reflete a adoção de funcionalidades avançadas, mas com ênfase marcante na solução de necessidades operacionais e comerciais específicas da região, especialmente na redução de perdas não técnicas. O resultado é um modelo latino-americano de AMI que combina atributos de segunda geração com adaptações específicas ao contexto local.



A análise das metas nacionais e dos níveis de penetração mostra que a região está caminhando para a modernização de seus sistemas de medição

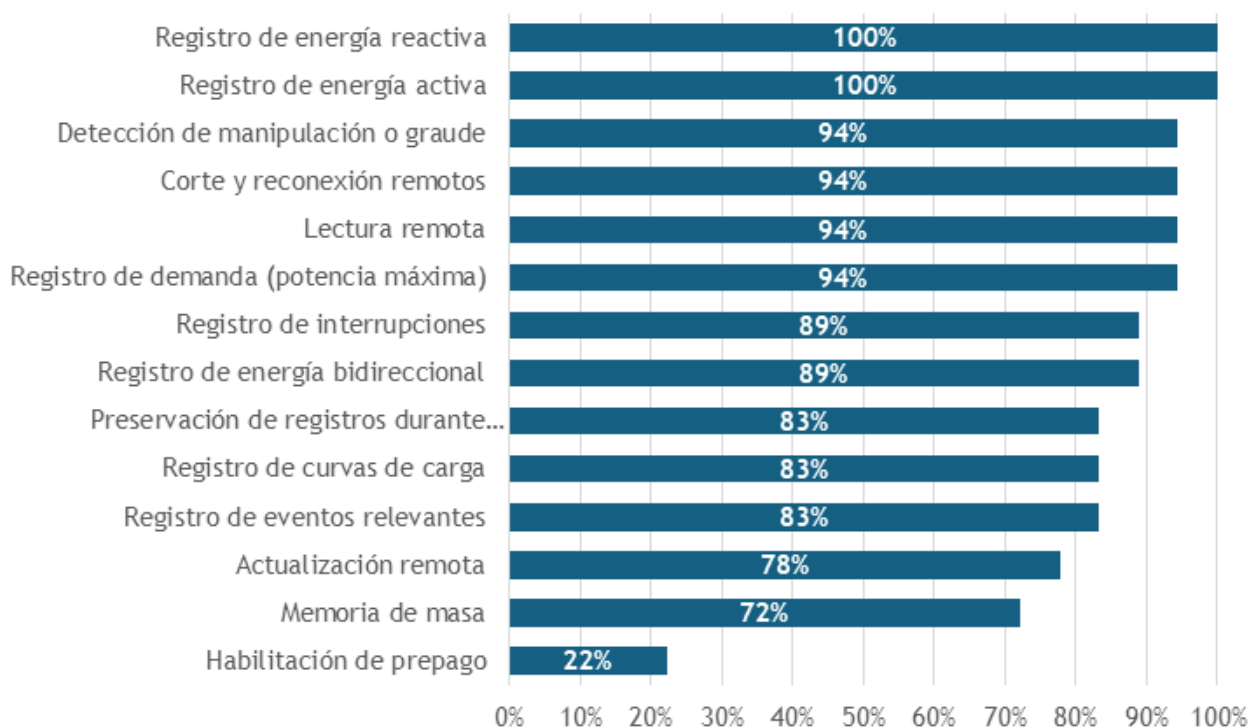


Figura 2. Frequência das funcionalidades AMI relacionadas pelos distribuidores pesquisados.

Um aspecto marcante dentro do conjunto de funcionalidades é a baixa presença da capacidade de pré-pagamento. Diferentemente de capacidades técnicas como registro de tempo, memória de massa ou detecção de adulteração, que dependem principalmente de hardware e arquitetura de comunicações, o pré-pagamento exige condições regulatórias, comerciais e processuais muito específicas. Sua implementação envolve a definição de regras de faturamento, mecanismos de cobrança, protocolos de desconexão e reconexão, e salvaguardas para clientes vulneráveis. Na região, apenas um número limitado de distribuidores declara essa funcionalidade, e sempre em mercados onde existe um arcabouço explícito que regula sua operação. As evidências sugerem que a ausência de pagamento antecipado não reflete um atraso tecnológico, mas sim a ausência de regulamentações que autorizem seu uso e estabeleçam as salvaguardas necessárias. Isso confirma que a expansão das funcionalidades voltadas para a gestão comercial avançada dependerá menos das capacidades técnicas e mais das decisões regulatórias sobre modelos de relacionamento com o consumidor.

TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

A capacidade de um sistema AMI de entregar as funcionalidades descritas na seção anterior depende diretamente da arquitetura de comunicações que suporta transmissão contínua, segura e confiável de dados. O valor operacional do registro temporal, eventos, detecção de adulteração ou interrupções e reconexões remotas só é alcançado quando há um canal de comunicação adequado entre medidores, hubs e plataformas de gerenciamento. Nesse contexto, caracterizar as tecnologias usadas pelas distribuidoras é essencial para compreender as capacidades reais do sistema e os limites impostos pela infraestrutura disponível. A implantação na América Latina mostra uma forte dependência de soluções de comunicação projetadas para se adaptar a redes heterogêneas e territórios complexos, o que

torna a seleção de tecnologia um elemento estratégico no desenvolvimento da AMI na região.

As respostas das empresas mostram que a região utiliza praticamente todo o espectro de tecnologias internacionalmente disponíveis, organizadas em torno de rede de área de vizinhança (NAN, em inglês Neighborhood Area Network) e rede de longa distância (WAN, em inglês Wide Area Network). Soluções baseadas em PLC (em inglês, Power Line Communication) predominam no NAN, especialmente em ambientes urbanos consolidados, juntamente com redes RF Mesh e variantes como Wi-SUN em áreas onde a topologia ou qualidade da rede dificulta a transmissão por linha de energia. Para a WAN, os distribuidores dependem extensivamente de redes celulares em suas diferentes gerações, desde 2G e 3G até LTE (Long Term Evolution) e 5G, complementadas em alguns casos por fibras ópticas ou links via satélite para áreas remotas. Essa diversidade reflete tanto a maturidade tecnológica disponível no mercado quanto a necessidade de adaptar a solução de comunicação a condições geográficas, climáticas e de densidade de carga muito variadas na região.

Uma característica marcante da implantação regional é que as distribuidoras não convergem para uma única tecnologia dominante, mas sim configuram arquiteturas híbridas que simultaneamente combinam PLC, radiofrequência e comunicações celulares dentro da mesma rede. Essa prática não responde à experimentação, mas a uma necessidade estrutural: nenhuma tecnologia única oferece desempenho suficiente diante da heterogeneidade das redes latino-americanas, que incluem áreas densas com ruído elétrico, extensas áreas rurais com baixa concentração de consumidores e setores com topologias complexas ou interferências relevantes. Como resultado, os sistemas AMI na região tendem a ser projetados do zero com múltiplas tecnologias em paralelo, equilibrando custo, robustez e co-

bertura, mas também introduzindo maiores demandas em integração, gerenciamento de redes de comunicações e padronização operacional.

Os desafios relatados pelas distribuidoras confirmam que as limitações não vêm da disponibilidade tecnológica, mas das condições operacionais em que essas soluções devem operar. No PLC, os problemas mais recorrentes são a atenuação do sinal e o ruído elétrico, por vezes agravados pelo uso de equipamentos de clientes não homologados, que injetam interferências na rede. Na frequência de rádio, as principais dificuldades estão relacionadas à necessidade de implantar repetidores ou concentradores adicionais para garantir cobertura em ambientes de baixa densidade ou geografia adversa, além da sensibilidade à interferência. As comunicações celulares enfrentam restrições de cobertura em áreas rurais, altos custos operacionais e dependência da disponibilidade e qualidade do serviço das operadoras. A isso se somam desafios transversais, como interoperabilidade entre tecnologias de diferentes fabricantes, sincronização de tempo de ponta a ponta, cibersegurança e, em alguns países, autorização regulatória para o uso de bandas livres. Esses elementos condicionam o desempenho do sistema e explicam por que a comunicação se torna um dos componentes mais críticos da implantação de AMI na região.

A diversidade tecnológica e os desafios operacionais identificados têm implicações diretas para a futura evolução dos sistemas AMI na região. A coexistência de múltiplas tecnologias de comunicação, arquiteturas híbridas e fornecedores distintos requer estruturas de interoperabilidade mais robustas, processos formais de homologação e padrões de comunicação que garantam a continuidade operacional ao longo de todo o ciclo de vida do sistema. Sem esses elementos, a complexidade técnica se traduz em

custos de integração mais altos, dificuldades de escalabilidade e riscos de fragmentação tecnológica. Portanto, o desempenho do sistema de comunicação não apenas condiciona a operação atual da AMI, mas também define o ponto de partida a partir do qual cada país e distribuidor poderá avançar para funcionalidades de segunda geração, integração de recursos distribuídos e plataformas digitais mais completas, o que motiva a análise apresentada na próxima seção.

A Tabela 3 resume as tecnologias de comunicação usadas nos sistemas AMI da região, diferenciando entre redes de área de bairro e redes de área ampla. A tabela ordena as principais abordagens tecnológicas e suas condições operacionais, mostrando que o design das arquiteturas de comunicação responde à heterogeneidade territorial e da rede, e não à existência de uma tecnologia dominante.



Tabela 2. Tecnologias de comunicação utilizadas em sistemas AMI na América Latina e suas principais condições operacionais.

Camada de comunicação	Tecnologia	Descrição da tecnologia	Uso predominante na região	Restrições operacionais relevantes
NAN	PLC	Transmissão de dados usando a rede elétrica de BT como meio de comunicação	Áreas urbanas consolidadas com alta densidade de rede	Sensível a ruído elétrico, qualidade da fiação e heterogeneidade das conexões
NAN	Mesh RF / Wi-SUN	Comunicação sem fio de curto e médio alcance com topologia mesh entre medidores	Ambientes com topologias complexas ou baixa qualidade de rede elétrica	Requer planejamento de cobertura e densidade mínima de nós
WAN	Redes celulares (2G–5G)	Uso da infraestrutura móvel pública para transportar dados para sistemas centrais	Conectividade entre hubs, HES e plataformas corporativas	Dependência da cobertura do operador e custos operacionais recorrentes
WAN	Fibra Ótica	Ligação física de alta capacidade para transmissão de dados	Nós críticos e áreas urbanas densas	Implantação limitada por custo e escopo territorial
WAN	Satélite	Comunicação via links de satélite para transmissão de dados	Áreas rurais extensas ou de difícil acesso	Uso pontual, devido a custos e latência
NAN + WAN	Arquiteturas híbridas	Combinando múltiplas tecnologias de comunicação em uma única rede AMI	Configuração predominante em redes heterogêneas	Aumento da complexidade de integração e interoperabilidade

INTEROPERABILIDADE, PADRÕES E TESTES DE CONFORMIDADE

A interoperabilidade é uma funcionalidade fundamental a ser considerada no planejamento da implementação de qualquer sistema AMI, permitindo que medidores, hubs e plataformas de gerenciamento operem sob uma arquitetura comum, independentemente do fabricante. No nível internacional, esse princípio é reconhecido como uma condição para evitar soluções fechadas e garantir a escalabilidade do sistema. No caso da América Latina, os resultados deste estudo mostram que essa dimensão ainda está em estágio inicial: arquiteturas proprietárias ou parcialmente abertas predominam, e apenas em alguns casos existe um arcabouço regulatório que estabelece padrões unificados de medição e comunicação. O quadro resultante é heterogêneo e apresenta níveis

dispares de padronização eficaz entre países e distribuidoras.

No nível internacional, o padrão mais difundido para medição inteligente é a família IEC 62056, baseada na especificação DLMS-COSEM, que define uma linguagem comum para troca estruturada de dados e serve de base para perfis nacionais, como o padrão brasileiro ABNT NBR 16968. Na América Latina, várias distribuidoras operam sob esses marcos, enquanto outras utilizam padrões ANSI, apropriados para medição convencional, mas com capacidades limitadas de interoperabilidade em arquiteturas multi-fornecedor. Mesmo quando um padrão aberto como o DLMS-COSEM é adotado, sua implementação prática varia entre os fabricantes, resultando em incompatibilidades que exigem ajustes, certificações ou desenvolvimentos específicos. Evidências mostram que a existência de um padrão não garante

total interoperabilidade e que seu sucesso depende tanto da qualidade da implementação quanto da consistência entre os provedores.

Na ausência de diretrizes formais amplamente adotadas, as distribuidoras latino-americanas gerenciam a interoperabilidade principalmente por meio de processos internos de homologação, testes laboratoriais e pilotos controlados que validam a compatibilidade entre medidores, hubs, sistemas de gerenciamento de dados e tecnologias de comunicação antes de autorizarem implantações em massa. Embora essa abordagem permita resolver incompatibilidades caso a caso, ela envolve altos custos, longos tempos de integração e, às vezes, dependência significativa do fornecedor dominante. Isso contrasta com as práticas de mercados mais avançados, onde a interoperabilidade é garantida por meio de certificações formais e esquemas de teste padronizados.

Os resultados da pesquisa mostram barreiras comuns que dificultam o progresso rumo à interoperabilidade eficaz. Elas incluem a persistência de protocolos proprietários, restrições regulatórias que limitam a adoção de certos padrões, implementações heterogêneas do mesmo protocolo e a ausência de laboratórios independentes ou esquemas nacionais de certificação. Essas condições restringem o uso total das funcionalidades possibilitadas pelos medidores e aumentam os custos de integração. No geral, a região enfrenta a necessidade de avançar em direção a diretrizes técnicas unificadas e mecanismos formais de certificação que permitam sustentar implantações de AMI escaláveis, seguras e tecnologicamente abertas, por exemplo, por meio da coordenação nacional de testes de integração e validação, do estabelecimento de laboratórios de referência ou do desenvolvimento de esquemas setoriais de certificação independentes.



INTEGRAÇÃO AMI COM SISTEMAS CORPORATIVOS

A capacidade de um sistema AMI de gerar valor depende não apenas de suas funcionalidades técnicas e infraestrutura de comunicação, mas também de sua integração com os sistemas corporativos da distribuidora e do uso analítico dos dados. Esta seção examina ambos os aspectos: primeiro, o grau de integração da AMI com plataformas operacionais e comerciais; e, segundo, os casos de uso que mostram como as informações coletadas são transformadas em melhorias concretas na operação, planejamento e gestão comercial. Isso caracteriza o nível de maturidade digital observado nos distribuidores participantes do estudo.

INTEGRAÇÃO COM PLATAFORMAS CORPORATIVAS

A capacidade de um sistema AMI de gerar valor depende de sua integração com as plataformas corporativas que as distribuidoras usam para operar, planejar e gerenciar seus clientes. Enquanto as seções anteriores caracterizaram as capacidades técnicas do medidor e da infraestrutura de comunicações que permitem capturar e transmitir dados, esta seção aborda o próximo passo crítico: como esses dados são incorporados aos sistemas de negócios, operacionais e analíticos da empresa. A integração determina se as informações de medição se traduzem em decisões operacionais oportunas, processos de negócios mais precisos e ferramentas avançadas de gerenciamento de rede. Como tal, é um indicador central do nível de maturidade digital alcançado nas implantações de AMI na região.

As respostas das distribuidoras mostram um quadro misto em termos do escopo e profundidade da integração. Na maioria dos casos, a infraestrutura AMI se conecta primeiro aos sistemas de faturamento e de negócios, permitindo que a leitura seja automatizada, melhorando a qualidade dos dados e reduzindo o retrabalho. Em um grupo mais restrito de empresas, observa-se

integração com plataformas operacionais como SCADA, OMS ou ADMS, o que permite usos relacionados à localização de falhas, supervisão de redes de BT e gerenciamento de interrupções. Outras distribuidoras ainda estão em estágios preliminares, operando pilotos com troca manual ou semiautomática de arquivos, ou planejando a incorporação de um MDM (Meter Data Management) como núcleo integrador. Em conjunto, esses resultados refletem diferentes níveis de maturidade digital e diferentes pontos de partida institucionais e tecnológicos dentro da região.

Quanto aos mecanismos usados para integrar AMI com sistemas corporativos, predominam arquiteturas baseadas em APIs (Application Programming Interface), serviços web e barramentos de integração corporativa, que permitem automatizar fluxos de informação entre MDM, sistemas de negócios e plataformas operacionais. Em alguns casos, são usados padrões como Multispeak ou CIM (Common Information Model), enquanto em outros a integração depende de conectores específicos fornecidos pelo fabricante do HES ou sistema comercial. Quando as implantações ainda são piloto ou iniciantes, a transferência de informações é feita por meio de troca manual ou semiautomática de arquivos, o que limita a frequência e a profundidade do uso operacional dos

dados. Esses resultados sugerem que a região está caminhando para esquemas mais modulares e baseados em serviços, embora soluções de diferentes escalas e maturidade de técnica ainda coexistam.

Por fim, várias distribuidoras relatam planos para aprofundar a integração à medida que suas implantações de AMI amadurecerem. Essas iniciativas incluem a incorporação progressiva de MDMs como repositórios centrais de dados, a ligação sistemática com plataformas operacionais para viabilizar funcionalidades avançadas como localização automática de falhas ou gerenciamento de flexibilidade, e o desenvolvimento de arquiteturas mais unificadas por meio de APIs padronizadas ou barramentos de integração. No entanto, persistem lacunas significativas: algumas empresas ainda não possuem infraestrutura AMI totalmente operacional, outras dependem de soluções proprietárias que dificultam a integração, e várias enfrentam restrições institucionais ou orçamentárias para modernizar seus sistemas legados. O panorama resultante mostra uma região em transição, onde a integração com a AMI corporativa avança, mas ainda de forma desigual e com espaços significativos para padronizar práticas e consolidar uma arquitetura digital interoperável.

Em resumo, o grau de integração alcançado condiciona diretamente o potencial analítico e operacional da AMI. Quando os dados fluem de forma estruturada para sistemas empresariais, operações e plataformas de gestão de ativos, casos de uso mais complexos são possibilitados, que transcendem a leitura e o faturamento. Por outro lado, quando a integração é parcial ou manual, o valor da medição inteligente se restringe aos benefícios operacionais centrais. Isso estabelece a base para a próxima seção, que examina como as distribuidoras da região estão começando a usar dados AMI para análises avançadas, detecção de perdas, otimização operacional e melhoria da qualidade do serviço.

ANÁLISES AVANÇADAS BASEADAS EM AMI

A adoção de análises baseadas em dados AMI na América Latina está em estágio inicial, embora com avanços significativos em um conjunto limitado de distribuidoras. Entre aqueles que desenvolveram casos de uso, predomina o foco na eficiência operacional e comercial: detecção e segmentação de perdas não técnicas, validação de consumo, balanços energéticos, previsão de demanda e otimização dos processos de leitura, faturamento e cobrança. Os resultados nesse âmbito já demonstram benefícios quantificáveis: foram reportados casos em que a evolução das ferramentas analíticas para o combate às perdas comerciais permitiu aumentar a taxa de detecção em cerca de 50% em relação aos métodos tradicionais, elevando a efetividade das inspeções de campo (true positive) em mais de 18 pontos percentuais. Ao mesmo tempo, uma proporção significativa das empresas ainda não possui capacidades analíticas sobre dados AMI, seja porque suas implantações estão na fase piloto, porque não possuem um MDM integrado ou porque a infraestrutura ainda não gera dados em escala suficiente. O quadro regional, portanto, reflete um nível heterogêneo de adoção, mas consistente com as prioridades estruturais da região em termos de perdas, precisão das medições e eficiência comercial.

Além desses usos iniciais, várias distribuidoras começaram a explorar aplicações operacionais que aproveitam a maior observabilidade proporcionada pelos medidores inteligentes. Entre os casos relatados estão a detecção precoce de desvios de tensão, a análise da capacidade de carga do transformador, a correlação de eventos com reclamações dos clientes e o uso de alarmes e curvas de carga para priorizar a manutenção. Em alguns sistemas, há progressos em direção à integração com plataformas OMS e ADMS para suportar localização de falhas e permitir esquemas FLISR, embora esses

casos ainda estejam em estágio parcial ou piloto. Adicionalmente, a infraestrutura AMI abre a oportunidade de desenvolver programas de gestão da demanda que permitam às distribuidoras contar com recursos de flexibilidade operacional, ampliando o alcance desses usos para além do monitoramento e controle da rede.

Apesar desses avanços, persistem lacunas relevantes que condicionam a consolidação das análises avançadas na região. A falta de integração total entre os sistemas AMI e corporativos limita a automação de processos e a exploração sistemática de dados. Em vários casos, a qualidade e a completude das informações são insuficientes para

viabilizar modelos preditivos ou análises operacionais complexas, e a dependência de soluções proprietárias restringe o acesso e o processamento de dados em formatos padronizados. Além disso, muitas distribuidoras ainda não possuem arquiteturas ou equipes de análise dedicadas ao desenvolvimento de casos de uso baseados em AMI. O conjunto de evidências sugere que a expansão da análise avançada à medida que a infraestrutura de dados for consolidada, os níveis de integração forem ampliados e as capacidades institucionais forem fortalecidas para explorar plenamente o potencial dessa tecnologia na gestão de redes e serviços elétricos.



GOVERNANÇA DE DADOS, CIBERSEGURANÇA E RELAÇÕES COM CONSUMIDORES

Embora as seções anteriores tenham caracterizado as capacidades técnicas do sistema AMI e sua integração com plataformas corporativas para permitir novos usos operacionais e analíticos, a adoção do medidor inteligente também apresenta desafios para a governança de dados, cibersegurança e relações com consumidores finais. Esses aspectos determinam não apenas a viabilidade institucional da implantação, mas também sua legitimidade social e confiança do consumidor no tratamento de informações sensíveis. Esta seção examina como as distribuidoras da região estão lidando com o acesso dos consumidores a seus dados, as práticas de cibersegurança aplicadas à infraestrutura de medição e os marcos regulatórios que regem a privacidade e o uso das informações geradas pela AMI. Esse cenário também abre uma oportunidade para incorporar progressivamente ferramentas de inteligência artificial na análise de dados AMI, como um mecanismo para ampliar e escalar os casos de uso.

ACESSO DO CONSUMIDOR ÀS INFORMAÇÕES

O acesso oportuno e transparente às informações de consumo é um dos atributos centrais dos sistemas modernos de AMI, permitindo que os consumidores compreendam seus padrões de uso, gerenciem melhor sua demanda e participem mais ativamente do serviço elétrico. Em nível internacional, esse componente é uma parte essencial da governança de dados e da relação digital entre distribuidor e cliente. Na América Latina, os resultados do estudo mostram progresso parcial: embora várias distribuidoras tenham permitido que canais digitais reportem as curvas de carga, a disponibilidade e profundidade desses mecanismos variam significativamente e ainda não constituem um padrão totalmente consolidado na região.

As experiências coletadas exibem dois níveis de maturidade. Um primeiro grupo de distribuidoras possui portais web e aplicativos móveis que permitem consultar o consumo quase em tempo real, visualizar curvas de carga, revisar histórico de faturamento e, em alguns casos, acessar módulos específicos para clientes com AMI. Essas soluções geralmente são suportadas por plataformas

comerciais ou módulos MDM que já estão integrados. Um segundo grupo fornece informações mais básicas, geralmente ligadas ao consumo mensal usado no faturamento, ou está na fase de design dos canais de acesso. Em vários casos, a habilitação de mecanismos mais avançados depende tanto do grau de implantação da AMI quanto da existência de diretrizes regulatórias que definam obrigações de disponibilizar dados ao consumidor final.

Apesar desses avanços, persistem lacunas que limitam o acesso totalmente funcional e padronizado. Elas incluem a ausência de formatos comuns para entrega de dados, interoperabilidade limitada com aplicativos de terceiros, ausência de canais unificados para visualização de custos ou informações de eventos operacionais, e a ainda reduzida massificação dos medidores inteligentes conectados. Essas condições restringem o potencial de engajamento ativo dos consumidores e antecipam desafios adicionais de cibersegurança e privacidade, que são abordados nas seções a seguir.

CIBERSEGURANÇA APLICADA À AMI

A expansão do acesso dos consumidores aos dados de consumo e a crescente digitalização dos sistemas de medição significam que as exigências de cibersegurança desempenham um papel central na operação das redes inteligentes. Ao contrário dos sistemas tradicionais, a infraestrutura AMI introduz milhões de pontos de entrada distribuídos que devem ser integrados de forma segura com plataformas corporativas e sistemas operacionais de rede. Os resultados da pesquisa mostram que, embora a região esteja avançando nessa área, há uma variabilidade significativa no grau de adoção de políticas formais, certificações e práticas de proteção de dados aplicadas ao ecossistema AMI.

Entre as distribuidoras com maiores avanços estão padrões alinhados a normas internacionais, como ISO/IEC 27001 para gestão de segurança da informação e ISO/IEC 27019 para sistemas industriais no setor de energia. Essas práticas são complementadas por requisitos técnicos específicos, como criptografia de ponta a ponta (incluindo esquemas AES de 128 bits), autenticação forte, segmentação de rede e testes de penetração durante os processos de aprovação de medidores e sistemas MDM/HES. Em vários países, a regulamentação está começando a exigir explicitamente essas práticas, com casos em que a certificação ISO 27001 será obrigatória para todas as distribuidoras nos próximos anos.

No entanto, os resultados também mostram que uma parte significativa das empresas está nos estágios iniciais de adoção. Nesses casos, os esforços são focados em diretrizes gerais de segurança institucional, medidas básicas de reforço de rede e controles sobre gestão de credenciais, sem ainda possuir estruturas específicas orientadas para AMI. A heterogeneidade observada reflete tanto diferenças regulatórias quanto lacu-

nas nas capacidades técnicas e de investimento. No geral, os resultados mostram que o progresso no acesso à informação e análises baseadas na AMI deve ser acompanhado por um fortalecimento sistemático das práticas de cibersegurança para proteger infraestruturas críticas e dados dos consumidores.

PRIVACIDADE E TRATAMENTO DE DADOS

A incorporação de capacidades avançadas de medição e a crescente disponibilidade de dados granulares de consumo aumentam a relevância dos marcos de privacidade que regulam o processamento dessas informações. Em contraste com a consolidação internacional de princípios específicos para dados energéticos, os resultados do estudo mostram que, na América Latina, a regulamentação aplicável vem, na maioria dos casos, das leis gerais de proteção de dados pessoais, e não de regulamentações setoriais dedicadas à AMI. Isso gera um panorama fragmentado, onde a proteção das informações depende tanto do arcabouço legal nacional quanto das práticas internas de cada distribuidor.

Países com legislação de proteção de dados mais desenvolvida aplicam seus princípios ao escopo da AMI: consentimento do consumidor, limitação de uso para fins autorizados, anonimização para análises operacionais e obrigações de segurança para controladores de dados. Em alguns casos, regulamentos setoriais complementam esses requisitos, como é o caso no Chile com as disposições sobre Sistemas de Medição, Monitoramento e Controle, ou na Colômbia, onde a regulamentação de medição inteligente se refere explicitamente às leis de habeas data. No entanto, uma proporção significativa de distribuidoras indica que não existe uma regulamentação específica sobre privacidade dos dados energéticos ou que desconhecem as diretrizes aplicáveis, o que evidencia lacunas institucionais na ges-

tão de informações sensíveis geradas pelos sistemas AMI.

A heterogeneidade observada sugere a necessidade de avançar para estruturas claras que definam direitos dos consumidores, obrigações de processamento e critérios de proteção para dados de consumo, em coerência com os princípios de transparência e segurança que acompanham a implantação das redes inteligentes. À medida que essas estruturas continuam a se desenvolver, a proteção eficaz da informação depende em grande parte das práticas internas, políticas corporativas e controles de acesso implementados por cada distribuidora, reforçando a importância de fortalecer as capacidades institucionais e garantir consistência entre privacidade, cibersegurança e regulamentações de acesso a dados do consumidor final.



O acesso oportuno e transparente às informações de consumo é um dos principais atributos dos sistemas AMI modernos



MODELOS ECONÔMICOS, FINANCIAMENTO E RECUPERAÇÃO DE INVESTIMENTOS

A adoção de infraestrutura avançada de medição não depende apenas de sua sofisticação técnica ou das capacidades operacionais que ela permite. Sua viabilidade e sustentabilidade são determinadas, em igual ou maior grau, pelos modelos de financiamento, pelos critérios econômicos aplicados pelas distribuidoras e pelos mecanismos regulatórios que permitem a recuperação dos investimentos realizados. Esta seção examina como as empresas da região estruturam a posse e o financiamento dos medidores, quais metodologias empregam para avaliar a desejabilidade econômica da implantação e até que ponto os marcos regulatórios nacionais reconhecem ou incentivam esses investimentos.

PROPRIEDADE E ESQUEMAS DE FINANCIAMENTO

A análise da infraestrutura de medição na América Latina revela uma profunda transição estrutural nos modelos de propriedade, impulsionada mais pela necessidade tecnológica do que por definições regulatórias. Historicamente, em grande parte da região, predominava um esquema em que o medidor eletromecânico era propriedade do consumidor final, que pagava pelo dispositivo no momento da conexão. No entanto, a natureza da AMI — de um ativo isolado a um sensor de rede integrado que exige gestão centralizada de dados, cibersegurança e constante renovação tecnológica — está forçando uma mudança para esquemas onde a propriedade e a responsabilidade pelo investimento recaem sobre o distribuidor. No entanto, a simples alocação de propriedade é insuficiente se não for acompanhada de uma modernização nos critérios para o reconhecimento dos ativos.

Com base nas informações coletadas das empresas associadas à ADELAT, é possível identificar três principais tipologias que agrupam estratégias de financiamento na região, diferenciadas pelo grau de sofisticação com que a regulamentação aborda a natureza digital desses investimentos.

O modelo de propriedade do distribuidor com reconhecimento regulado é mais fi-

nanceiramente sustentável e corresponde àqueles mercados onde a regulamentação evoluiu para reconhecer explicitamente o medidor inteligente como um ativo de rede, pertencente ao concessionário e cuja remuneração é garantida na tarifa. No Brasil, essa abordagem foi claramente proposta no âmbito da Consulta Pública 198/2025 (aberta em setembro e ainda em andamento), que visa incorporar os medidores à Base Regulatória de Remuneração (BRR). No entanto, mesmo nesse panorama avançado, desafios críticos persistem, como a necessidade de adaptar vidas úteis regulatórias, pois, ao contrário dos ativos eletromecânicos amortizáveis por 30 anos, os componentes AMI (módulos de comunicação, software) possuem ciclos tecnológicos de obsolescência muito mais curtos. Portanto, o financiamento sustentável nesse modelo exige avançar para mecanismos acelerados de depreciação que alinhem a recuperação de capital com a vida útil real da tecnologia, evitando o risco financeiro de manter ativos que não estão mais operacionais nos registros.

Uma lógica semelhante é observada no modelo de serviço público verticalmente integrado da Costa Rica. Lá, o medidor pertence à empresa estatal de eletricidade, e o financiamento é estruturado por meio de uma combinação de capital próprio e alavancagem com bancos multilaterais, destacando o uso de empréstimos do BID para modernização. Ao operar sob um modelo de serviço a custo sem pressão de curto pra-

zo do mercado, o financiamento pode ser alinhado com instrumentos soberanos ou de dívida corporativa de longo prazo, facilitando a amortização da tecnologia. A lição desse grupo é que a propriedade da distribuidora funciona, desde que a regulamentação aceite que os custos de licenciamento, cibersegurança e telecomunicações são investimentos essenciais e não “ineficiências” operacionais.

Um segundo grupo de países está passando por uma fase de transição regulatória, migrando de um regime em que o cliente comprava o medidor para um em que a lei atribui responsabilidade ao distribuidor, gerando atritos financeiros não resolvidos. O Chile e, em menor grau, a Colômbia, ilustram essa tensão. A legislação transferiu a obrigação de investimento para a empresa, mas ela enfrenta o problema dos “ativos isolados”: como financiar os novos medidores inteligentes sem ter terminado de depreciar ou recuperar o valor dos medidores convencionais que serão aposentados antecipadamente. Sem um mecanismo regulatório explícito para recuperar o valor residual dos equipamentos aposentados, as distribuidoras são forçadas a financiar a modernização com seu próprio capital e alto risco, limitando a implantação apenas aos pilotos. Nesses mercados, a propriedade já pertence à distribuidora, mas falta uma engenharia financeira regulatória que permita substituir o parque de medidores sem destruir o valor contábil para o concessionário ou gerar choques tarifários insustentáveis para o consumidor.

Propriedade da distribuidora sem reconhecimento explícito. Existe um terceiro grupo de países onde a distribuidora mantém a propriedade dos equipamentos AMI de fato implantados, mas enfrenta barreiras críticas de financiamento devido à ausência de sinais de preço. Conforme relatado por associados da ADELAT, esse é o panorama predominante na Argentina, Peru e Guatemala, onde os investimentos são feitos exclusivamente com o fluxo de caixa operacional da

empresa, motivados por urgências específicas, como a redução de perdas não técnicas ou a atenção aos grandes consumidores, mas sem um mecanismo de “pass-through” para a tarifa regulamentada. A barreira estrutural nesses casos é a falta de reconhecimento da “intangibilidade” do investimento. Como não existem categorias regulatórias nesses países para capitalizar software ou reconhecer tecnologia OPEX eficiente, as distribuidoras não podem escalar projetos além de nichos de alta rentabilidade devido à recuperação tarifária. A experiência desse grupo confirma que atribuir a propriedade à distribuidora sem modernizar o catálogo de contas regulatórias condena a AMI a ser uma tecnologia de nicho e não uma infraestrutura universal.

Essa disparidade regional mostra que, embora a tendência técnica aproxime a propriedade da distribuidora, a velocidade de implantação depende da existência de um veículo tarifário (como o RAB ou o TOTEX) que reduza o risco de investimento tecnológico.

BUSINESS CASE E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Embora o consenso técnico aponte para a medição inteligente como a espinha dorsal da transição energética, a equação econômica local para justificar seu investimento (business case) é muito mais complexa de viabilizar do que em economias desenvolvidas. A região opera sob uma lógica financeira heterogênea, onde o motor de investimento varia conforme a urgência de cada concessão. Com base nas informações fornecidas pelos associados da ADELAT, é possível distinguir duas orientações na forma como as distribuidoras constroem seus business cases para a AMI, marcadas pela diferença em seus principais motores de valor.

O primeiro grupo utiliza uma abordagem de recuperação de perdas, predominante na Argentina, Peru, Guatemala e áreas es-

pecíficas do Brasil. Segundo distribuidoras nesses mercados, a tradicional Análise de Custo-Benefício (ACB) só traz resultados positivos quando aplicada a áreas com altas taxas de fraude ou roubo de energia. Nesse sentido, o investimento em AMI é quase exclusivamente justificado por sua capacidade de reduzir Perdas Não Técnicas (PNTs) e recuperar receita, e o medidor inteligente é visto como uma ferramenta de “controle de receita” em vez de uma ferramenta de modernização operacional. A consequência desse modelo é uma implantação fragmentada: a tecnologia alcança bairros problemáticos ou grandes consumidores industriais, mas não há incentivos para expandir para o grande cliente residencial com bom comportamento de pagamento, onde o retorno sobre a recuperação de perdas é zero.

O segundo grupo corresponde à abordagem de eficiência operacional, predominante no Chile e nas áreas de distribuição mais maduras do Brasil e Colômbia. Lá, os business cases incorporam uma matriz mais ampla de economias operacionais (OPEX), como a eliminação da leitura presencial, a redução dos custos de desligamento e reconexão em campo, e a diminuição de perdas não técnicas. No entanto, esse modelo enfrenta uma barreira estrutural típica das economias latino-americanas: o custo relativamente baixo da mão de obra. Diferente da Europa ou dos Estados Unidos, onde eliminar a leitura presencial gera uma economia gigantesca que o medidor paga, na América Latina essa economia é menor. Por essa razão, mesmo em países como o Chile, o business case é sólido e frequentemente exige uma visão de longo prazo que as tarifas atuais nem sempre incentivam.

A conclusão transversal é que os modelos tradicionais de avaliação financeira, restritos ao fluxo de caixa da empresa, são insuficientes para promover a implantação universal na região. Nesse sentido, experiências recentes na região mostram uma evolução de avaliações financeiras internas para esquemas onde o ACB é exigido em nível re-

gulatório, aplicado gradualmente por fases, segmentos e tipologias de rede, e usado como ferramenta de priorização de implantação e não como condição binária de autorização (CREG, 2025). Se a AMI for instalada apenas onde for lucrativo para a empresa (áreas de roubo ou grandes clientes), a divisão digital energética se aprofundará. Para superar essa estagnação, é imprescindível avançar para uma Análise de Custo-Benefício (ACB) social e sistêmica. Essa abordagem deve ser suficientemente flexível para capturar as particularidades de cada distribuidora, considerando diferenças na topologia da rede, nos padrões de consumo e nas oportunidades específicas de melhoria em desempenho, resiliência e postergação de investimentos, de modo que a priorização da implantação responda a critérios técnicos e sociais, e não apenas à rentabilidade privada de curto prazo. A avaliação regulatória deve também monetizar aqueles benefícios que a tecnologia traz para a sociedade, mas que hoje são invisíveis no balanço patrimonial da distribuidora. Primeiro, é necessário incorporar melhorias na resiliência e na qualidade do serviço. A capacidade da AMI de localizar automaticamente falhas reduz as taxas de interrupções. Se a regulamentação valoriza essa energia não fornecida ao custo do fracasso da economia (VoLL, Value of Lost Load), o projeto AMI multiplica sua rentabilidade social.

Segundo, os benefícios sistêmicos evitados devem ser quantificados. A gestão da demanda e dos preços horários possibilita achatar a curva de carga, adiando investimentos milionários em reforços e expansão da rede. Se o regulador permitir que a distribuidora capture uma fração dessa economia de capital diferida, a implantação se torna viável.

Por fim, os critérios de avaliação devem abandonar a ideia de “custo médio nacional”. A regulamentação deve permitir avaliações por agrupamentos ou tipologias de zonas, reconhecendo que os custos e benefícios não são homogêneos. Por outro lado,

os horizontes de amortização precisam ser ajustados. Avaliar ativos digitais com a vida útil dos ativos físicos (30 anos) é um erro financeiro. Os modelos devem reconhecer ciclos de reposição tecnológica de 10 a 15 anos, ou até menores, conforme a evolução tecnológica, para os componentes de comunicação e computação, garantindo que a tarifa cubra a real sustentabilidade da inteligência da rede.



BARREIRAS AO ESCALONAMENTO E CONDIÇÕES HABILITADORAS

O avanço da infraestrutura avançada de medição na América Latina tornou possível acumular aprendizados relevantes em termos técnicos, operacionais e econômicos. No entanto, a implantação enfrenta um “paradoxo da implementação”: embora haja um consenso técnico e político quase unânime sobre seu papel indispensável como sistema nervoso da transição energética, a realidade operacional revela uma execução fragmentada. A transição de implantações ou pilotos limitados para adoção em massa continua condicionada por um conjunto de barreiras estruturais que transcendem a disponibilidade tecnológica.

Mesmo quando há histórias de sucesso e business cases favoráveis em segmentos específicos, a escalabilidade enfrenta restrições regulatórias, econômicas, tecnológicas, operacionais e sociais que refletem uma incompatibilidade sistêmica entre a natureza disruptiva da tecnologia digital e os marcos institucionais projetados sob paradigmas do século passado, e que precisam ser abordados de forma abrangente. Esta seção sintetiza essas barreiras e coleta lições da experiência com fornecedores e soluções de AMI, a fim de identificar as condições necessárias para a transição para implantações em maior escala.

BARREIRAS REGULATÓRIAS E ECONÔMICAS

O principal obstáculo para a escalabilidade da AMI geralmente está na arquitetura regulatória e financeira que determina como o investimento é (ou não) remunerado e, portanto, quão financiável é a implantação. Em grande parte da região, ainda falta um arcabouço regulatório explícito que defina obrigações, incentivos e mecanismos de remuneração específicos para medição inteligente. Consequentemente, as implantações tendem a depender de business cases internos e pilotos, em vez de programas massivos com previsibilidade de receita e regras claras de gradualidade. Não obstante, a evidência também sugere que essas barreiras tendem a se atenuar quando a implantação do AMI é articulada com processos de modernização tarifária, que permitem uma alocação mais granular de custos e benefícios entre os consumidores e reforçam a coerência econômica do modelo regulatório.

Uma parte importante da regulamentação na região foi construída sobre a lógica de

uma empresa de referência, projetada para padronizar custos de ativos físicos relativamente estáticos com longa vida útil. No entanto, a AMI desafia essa lógica, pois se comporta como um investimento digital com ciclos de inovação mais rápidos. Essa diferença não é meramente conceitual: ela determina quais custos são considerados “prudentes”, quais períodos de recuperação são assumidos e quais riscos são transferidos para a distribuidora.

Um ponto crítico que muitas vezes é subestimado é a assimetria CAPEX/OPEX. Embora o medidor possa ser reconhecido como um ativo de rede, o valor da AMI é plenamente realizado quando um ecossistema operacional intensivo em custos (software, nuvem, telecomunicações) é financiado e operado, permitindo a “inteligência” da rede. Quando a regulamentação privilegia o CAPEX e trata esses componentes OPEX como “ineficiências”, o business case é enfraquecido justamente onde são geradas capacidades transformacionais: automação operacional, análise de perdas, segmentação de consumo e viabilização de novos serviços.

Além disso, mesmo com o reconhecimento de ativos, os esquemas tarifários nem sempre capturam os benefícios sistêmicos atribuíveis à AMI (redução de perdas, eficiência operacional, gestão avançada da demanda). O resultado é uma lacuna entre o valor social/setorial do investimento e sua recuperação financeira, o que reduz o apetite por escala, especialmente quando a implantação precisa competir com outras prioridades de investimento.

Somado a esse conjunto de tensões há um atrito contábil que afeta a velocidade da modernização: ativos não amortizados. A substituição em massa de medidores legados pode envolver a aposentadoria de equipamentos que ainda mantêm valor contábil. Sem um mecanismo de recuperação ou tratamento regulatório claro, a modernização resulta em destruição imediata do valor para a distribuidora, mesmo quando os benefícios a longo prazo são positivos.

Por fim, a região enfrenta uma barreira macroeconômica adicional: risco cambial e dificuldade de acesso a financiamento em economias voláteis, o que amplifica o descompasso entre investimentos em moeda forte e tarifas locais, afetando a bancabilidade da implantação e elevando o limiar de decisão para programas massivos.

BARREIRAS TECNOLÓGICAS E DE INFRAESTRUTURA

Em termos tecnológicos, a principal lição é que as limitações não estão apenas no medidor, mas no ecossistema que o cerca: comunicações, interoperabilidade, integração com sistemas corporativos e governança de dados. Quando qualquer um desses links é enfraquecido, a confiabilidade dos dados é reduzida e, conseqüentemente, o valor operacional da AMI diminui, afetando a disposição para escalar.

A conectividade é um desafio particularmente sensível na América Latina. Distribuidoras relatam dificuldades na estabilidade das comunicações, especialmente em redes PLC expostas a ruído elétrico e em áreas rurais onde a cobertura celular é limitada. E, quando é usada radiofrequência, densidades de medidores podem ser necessárias, as quais nem sempre são alcançadas, originando sensibilidades a obstáculos físicos. Essas restrições não só tornam a solução mais cara, como também introduzem incerteza sobre o desempenho homogêneo do sistema em ambientes heterogêneos.

Além disso, há uma lacuna de última milha que obriga, em certos territórios, a implantar redes privadas caras. Ao mesmo tempo, o desligamento progressivo das redes 2G/3G introduz um risco de obsolescência acelerada não controlada pelo setor elétrico, o que força o desenho de arquiteturas e estratégias de compra com uma visão do ciclo de vida tecnológico, e não apenas com critérios iniciais de custo.

A interoperabilidade é outra barreira decisiva. A coexistência de múltiplas tecnologias de medição e comunicação aumenta a complexidade operacional e exige processos contínuos de integração. Mesmo com padrões abertos, variações em sua implementação geram incompatibilidades que exigem aprovações adicionais, testes extensos e ajustes específicos. Tudo isso aumenta custos, estende prazos de entrega e aumenta o risco de desempenho durante a escalada.

Ao mesmo tempo, a falta de padrões obrigatórios e certificação local aumenta o risco de vendor lock-in e dificulta a integração entre múltiplos fornecedores. Isso não afeta apenas a implantação inicial: condiciona a capacidade futura de evoluir a plataforma, integrar novos casos de uso e manter um gerenciamento consistente de dados a longo prazo.

Por fim, a cibersegurança surge como uma barreira de nova geração. A AMI expande a superfície de ataque e exige investimentos sustentados em defesa (por exemplo, SOC - Security Operations Center - e criptografia). Quando a regulamentação não define claramente quem financia essas capacidades ou como elas são reconhecidas, um duplo efeito é gerado: maior risco sistêmico e freio econômico na escala.

BARREIRAS OPERACIONAIS E DE IMPLEMENTAÇÃO

Barreiras operacionais e de gestão de fornecedores também têm um impacto significativo na capacidade de escalar a AMI. As distribuidoras identificam prazos estendidos para fabricação e entrega de equipamentos que dificultam o agendamento e podem afetar o cumprimento de planos regulamentados ou objetivos corporativos. Em programas de grande escala, essa variável define o ritmo real de implantação, bem como o sequenciamento territorial e a capacidade de capturar benefícios no tempo esperado.

Além disso, há dependência do suporte técnico internacional, o que em alguns casos introduz atrasos na resolução de problemas e limita a capacidade de responder a contingências operacionais. Essa dependência torna-se mais crítica à medida que o parque instalado aumenta, pois os incidentes deixam de ser excepcionais e passam a fazer parte da operação diária. Sem capacidades locais suficientes, o tempo de recuperação pode deteriorar a percepção interna da confiabilidade do sistema.

De forma complementar, a escalabilidade exige um fortalecimento contínuo das capacidades internas: administração das plataformas AMI, operação de banco de dados, monitoramento, cibersegurança e gestão da infraestrutura de TI. Essa dimensão é fundamental porque a AMI não gera valor apenas por meio da leitura remota, mas também pela capacidade institucional de converter dados em decisões e automações, o que exige investimentos adicionais e treinamen-

to contínuo, bem como a gestão eficiente do desafio logístico associado à substituição física de equipamentos em grande escala, de forma produtiva, otimizada e confiável..

As experiências disponíveis também ressaltam a relevância de uma estratégia de compras e contratos alinhada ao risco do programa. Planejar compras coordenadas e garantir condições contratuais que mitiguem compatibilidade, desempenho e riscos pós-venda torna-se um fator facilitador para que a escalabilidade não fique presa a estouros de custos de integração ou lacunas de suporte.

BARREIRAS SOCIAIS E CULTURAIS

A escalabilidade AMI exige uma "licença social" que nem sempre é garantida. Em contextos onde a instalação é voluntária ou há desconfiança sobre o impacto das tarifas, a adoção pode ser significativamente atrasada devido a desinformação, percepções erradas ou medos associados à privacidade, chegando até mesmo a ir à justiça. Como resultado, comunicação e transparência deixam de ser atividades complementares e se tornam componentes estruturais do programa.

Em áreas rurais ou de difícil acesso, a dimensão social é combinada com complexidade logística: a instalação pode exigir maiores esforços de coordenação comunitária, apoio técnico e estratégias de relacionamento diferenciadas. Nesses ambientes, a aceitação pelo consumidor final torna-se um determinante central para a massificação, mesmo quando análises técnicas e econômicas são favoráveis.

Um capítulo particularmente crítico na região é a segurança física e a fraude em territórios com alta vulnerabilidade social e níveis críticos de perdas não técnicas. Nesses contextos, o medidor pode ser percebido como uma ameaça às economias informais, aumentando o risco de vandalismo, roubo de equipamentos e violência contra o pessoal, com custos operacionais e de se-

gurança que dificultam qualquer suposição de eficiência padrão. Esse fator não só torna a implantação mais cara: também condiciona a priorização territorial, os protocolos de instalação e o orçamento de manutenção do parque AMI.

Essas barreiras tendem a se reforçar mutuamente. Conectividade imperfeita ou interoperabilidade fraca aumentam custos e prazos, o que agrava o problema da recuperação tarifária e da bancabilidade. Por sua vez, a falta de clareza regulatória sobre OPEX digital e cibersegurança reduz a capacidade de sustentar o ecossistema que torna a AMI valiosa. E, em ambientes de baixa confiança ou alto conflito territorial, a implantação se torna mais cara e mais lenta, justamente quando a programação e a continuidade operacional são essenciais para captar benefícios.

CONDIÇÕES HABILITADORAS

Superar essas barreiras exige avançar em um conjunto de condições que permitam sustentar implantações em maior escala e, acima de tudo, capturar o valor integral da AMI como infraestrutura digital crítica. Primeiro, os marcos regulatórios precisam evoluir do reconhecimento do medidor como um ativo físico para o reconhecimento do ecossistema AMI como facilitador da eficiência, resiliência e modernização do serviço. Isso envolve estabelecer regras explícitas e previsíveis que garantam a recuperação de custos ao longo do ciclo de vida, incluindo componentes intensivos em OPEX (software, nuvem e telecomunicações), e definir tratamentos claros para ativos substituídos com valor contábil restante. Da mesma forma, a avaliação regulatória deve monetizar os benefícios sociais que atualmente são "invisíveis" no balanço da distribuidora, por exemplo, melhorias na resiliência e qualidade do serviço, e benefícios sistêmicos evitados pela gestão da demanda, permitindo que a empresa capture uma fração desse valor quando sua materialização for verificada.

Segundo, os atritos tecnológicos que tornam a escalabilidade mais cara precisam ser reduzidos. Para isso, é prioridade estabelecer padrões técnicos obrigatórios, perfis nacionais de interoperabilidade e mecanismos formais de certificação e testes de conformidade que reduzam os custos da integração entre múltiplos fornecedores e mitiguem o bloqueio tecnológico. Ao mesmo tempo, o planejamento coordenado das comunicações, incluindo estratégias para a "última milha" e a obsolescência tecnológica (por exemplo, transição 2G/3G), deve ser tratado como pré-requisito do programa, com acordos iniciais com operadores e/ou implantações de redes privadas quando necessário, para garantir cobertura e qualidade dos dados. Paralelamente, a cibersegurança deve ser assumida como um requisito de design e operação, com demandas mínimas e reconhecimento de custos, dado que a AMI expande a superfície de ataque e está cada vez mais integrada em ambientes de TI/OT.

Terceiro, a escalabilidade deve ser gerenciada como um programa operacional e não como a soma de projetos. Isso significa fortalecer as capacidades internas (gestão de dados, plataformas AMI, integração, análise e cibersegurança), fortalecer a estratégia de compras e contratação com acordos de nível de serviço (SLAs, Service Level Agreement) verificáveis e governança de versões/firmwares, além de antecipar a logística em massa (instalação, controle de qualidade, reabastecimento e suporte). Por fim, é essencial consolidar uma estratégia de relacionamento com os consumidores que fortaleça confiança, transparência e percepção de valor, abordando preocupações de privacidade e evitando resistência que possa se traduzir em atrasos ou litígios, e, em territórios com alta vulnerabilidade e perdas não técnicas, incorporar medidas específicas de segurança física e proteção de pessoal, ajustando sequências de implantação e custos de manutenção às realidades locais. A Tabela 4 resume as barreiras e suas respectivas condições habilitadoras.

Tabela 3. Resumo das barreiras à escala e condições facilitadoras.

Grupo	Barreira	Condição habilitadora
Regulação e economia	Ausência de um arcabouço regulatório explícito (obrigações, incentivos e mecanismos de remuneração) que permita a transição de programas piloto para programas de massa	Roteiro regulatório da AMI (metas, gradualidade, governança, obrigações mínimas de desempenho) e mecanismo de recuperação de custos (reconhecimento com base regulatória/renda permitida ou esquema equivalente).
	Abordagem de "modelo empresarial" que padroniza ativos físicos estáticos e transfere riscos para o distribuidor em relação aos investimentos digitais	Ajuste de critérios de eficiência para investimentos digitais: referências por resultados, KPIs e reconhecimento dos custos associados à evolução tecnológica.
	Assimetria CAPEX/OPEX: O valor da AMI depende de software, nuvem e telecomunicações	Adoção de lógica de custo total e/ou esquemas TOTEX; criação de categorias regulatórias para capitalizar software ou reconhecer OPEX tecnológico.
	Os esquemas tarifários não capturam benefícios sistêmicos da AMI (redução de perdas, eficiência operacional, gestão da demanda)	Metodologias para monetização e compartilhamento de benefícios: parte do valor é transferida para os consumidores e parte é mantida como incentivo para o desempenho.
	Ativos não amortizados	Implementação de tratamento regulatório para ativos de aposentadoria antecipada (amortização acelerada, fundo de transição, diferimento regulatório ou mecanismo equivalente) e regras para evitar choques tarifários.
	Risco cambial e dificuldade em acessar financiamento	Mecanismos de hedge/mitigação (indexação parcial, reconhecimento de variações de custos tecnológicos, financiamento multilateral/financiamento misto).
Tecnologia e infraestrutura	Lacuna de última milha	Plano diretor de comunicações (por tipologia territorial), priorizando soluções híbridas e acordos com operadoras de telecomunicações
	Desligar redes 2G/3G: risco descontrolado de obsolescência	Incorporação de critérios do ciclo de vida tecnológico nas especificações, aquisições e em uma estratégia de transição planejada.
	Interoperabilidade complexa: múltiplas tecnologias e padrões geram incompatibilidades, aprovações e estouros de custo.	Estabelecimento de perfis de interoperabilidade, testes de conformidade e um "catálogo de compatibilidade"
	Ausência de padrões obrigatórios e certificação local	Esquemas de padronização e certificação nacionais/setoriais que reduzem riscos e custos de interoperabilidade.
	Risco de dependência tecnológico (vendor lock-in)	Estratégia multi-fornecedor com requisitos de portabilidade de dados, APIs abertas, cláusulas de saída e continuidade; priorizando padrões abertos verificados por certificação.
	Cibersegurança	Requisitos mínimos (criptografia, autenticação, segmentação, reforço, testes de penetração) e reconhecimento explícito dos custos de segurança
		Criar o Escritório de Transformação PMO/AMI e o plano de capacidades (perfis, treinamento, operação de plataforma, análises, cibersegurança); definir KPIs e qualidade dos dados desde o início.
Social e cultural	Falta de "licença social": desconfiança e desinformação	Estratégia de relacionamento: comunicação proativa (benefícios tangíveis), protocolos de privacidade, canais de serviço e gestão antecipada de disputas; segmentar as mensagens por tipo de consumidor/território.
	Áreas rurais ou de difícil acesso	Implantações diferenciadas (rural/peri-urbano/urbano), com parceiros locais, horários adaptados, logística reforçada e uma abordagem de "primeiros benefícios" (casos de uso que o consumidor percebe cedo).
	Segurança física e fraude em territórios com alta vulnerabilidade e perdas não técnicas	Plano de segurança abrangente: protocolos de instalação, coordenação com autoridades/comunidade, medidas antifraude, proteção de pessoal, substituição e custos explícitos de manutenção no projeto do programa.

TIPOS DE MODELOS REGULATÓRIOS E DESENHO DE MERCADO

Modelos exigidos pelo Estado com implantação em massa

A adoção acelerada de infraestrutura avançada de medição foi possibilitada, em vários países, graças a estruturas regulatórias que estabelecem metas obrigatórias de cobertura, prazos definidos e padrões funcionais mínimos aplicáveis a todos os consumidores do sistema. Sob essa lógica, a política pública assume um papel de liderança e reduz a discricionariedade das distribuidoras ao estabelecer um cronograma de implantação e garantir a recuperação tarifária dos investimentos associados. O resultado é um processo de implantação uniforme, com altos níveis de padronização e uma velocidade de execução difícil de alcançar por meio de estratégias voluntárias ou graduais. Sob essa lógica, a experiência da União Europeia mostra como uma implantação massiva pode ser sustentada e ampliada quando é apoiada por um arcabouço regulatório progressivamente desenvolvido, que reduz a incerteza regulatória e operacional ao esclarecer objetivos, requisitos mínimos e interoperabilidade. Um marco inicial foi o Terceiro Pacote de Energia, em particular a Diretiva 2009/72/CE, que vinculou a avaliação ex-ante a uma meta política de longo prazo de 80% de cobertura dos consumidores até 2020, e exigiu que os Estados-Membros desenvolvessem e mantivessem seus ACBs com base nisso. Quando o resultado for positivo, devem traduzi-lo em planos e cronogramas nacionais de implantação. Posteriormente, a Recomendação 2012/148/UE contribuiu para a harmonização da metodologia ACB e consolidação dos requisitos funcionais,

bem como diretrizes sobre segurança e proteção de dados, reforçando as condições de padronização necessárias para uma implantação uniforme. Paralelamente, a Comissão promoveu a harmonização técnica por meio de mandatos de padronização para garantir interoperabilidade e mitigar riscos de vendor lock-in. Com o Pacote de Energia Limpa, especialmente a Diretiva (UE) 2019/944, aspectos críticos para a implantação em larga escala foram reforçados, incluindo o funcionamento do mercado varejista, direitos do consumidor, cibersegurança e governança de dados. Por fim, a medição para fins de faturamento é apoiada pelo arcabouço legal de metrologia (por exemplo, Diretiva 2014/32/UE – MID), proporcionando certeza sobre a conformidade técnica e estabelecendo requisitos no mercado.

As experiências da Itália e da Espanha são representativas dessa abordagem em sua forma mais estruturada e centralizada. A Itália foi pioneira com o programa Telegestore, desenvolvido pela Enel entre 2001 e 2011, que substituiu cerca de 32 milhões de medidores na primeira implantação em massa do mundo. O plano contava com apoio regulatório explícito e permitia que distribuidoras recuperassem os custos de investimento por meio de componentes tarifários aprovados. Do ponto de vista regulatório, a regulamentação italiana permitiu que distribuidores iniciassem voluntariamente a implantação, após aderir e submeter um plano detalhado ao regulador. A estrutura estabeleceu metas vinculativas e prazos precisos, definidos em volumes de medidores a serem instalados e cronogramas de execução. O reconhecimento dos custos na tarifa e dos incentivos era condicionado ao cumprimento desses compromissos (baseado em produção), e sanções foram aplicadas para não conformidade significativa. O arcabouço re-

regulatório também incorporou requisitos reforçados em termos de cibersegurança, interoperabilidade e maior granularidade dos dados. A Espanha seguiu uma estratégia semelhante com a Ordem IET/290/2012, que estabeleceu a substituição obrigatória de todos os medidores com menos de 15 kW até 2018, atingindo quase 28 milhões de instalações. O regulador definiu os parâmetros de reconhecimento tarifário e supervisionou a execução por meio dos marcos anuais de conformidade.

Outra trajetória relevante é a dos países nórdicos, que avançaram cedo ao impor obrigações de leitura remota e medição horária para todos os consumidores, integrando a AMI dentro de uma visão ampla de digitalização do sistema. A Suécia completou sua primeira implantação nacional em 2009 e lançou uma segunda geração a partir de 2020, com maiores demandas em funcionalidade, qualidade de serviço e capacidade de integração com recursos distribuídos. A Finlândia seguiu um caminho semelhante com uma obrigação regulatória que exigia alcançar mais de 80% de cobertura em 2014, acompanhada de padrões avançados para reporte de eventos e notificações automáticas.

Na Ásia, o Japão é outro exemplo emblemático de mandato estatal. Após a crise energética de 2011, a medição avançada foi integrada à estratégia de modernização do setor elétrico e estabelecida como requisito para a liberalização total do mercado varejista. Distribuidores regionais, como o TEPCO, foram instruídas a executar implantações massivas, com planos que incluíam mais de 80 milhões de instalações e a meta de cobertura total até 2024. Na França, o programa Linky, liderado pela Enedis, foi estruturado por meio de um mandato central com o objetivo de instalar 35 milhões de medidores em cinco anos, financiado por meio de um mecanismo regulado de recuperação diferida e uma taxa de remuneração superior ao padrão: 7,25% para ativos Linky, com um incentivo adicional de +300 pontos

base para ativos colocados em serviço entre 2015 e 2021, frente a um WACC padrão onshore de 5,0% real antes de impostos.

Apesar de sua eficácia em acelerar a implantação, esse tipo de estratégia apresenta desafios significativos para a replicação. Isso exige instituições regulatórias fortes, estabilidade política e um ambiente tarifário capaz de absorver investimentos massivos sem afetar a acessibilidade do serviço. Em contextos de restrições fiscais ou com distribuidores financeiramente enfraquecidos, um mandato universal pode gerar tensões entre prazos regulatórios e a capacidade real de execução. Além disso, a imposição de um cronograma único reduz a flexibilidade para adaptar tecnologias, padrões ou modelos operacionais às condições locais, o que pode levar a estouros de custos ou obsolescência precoce dos equipamentos. Essas limitações levaram várias jurisdições a preferir abordagens baseadas em análise de custo-benefício e implantações faseadas, que permitem avaliar a relevância do investimento antes de adotar compromissos de cobertura universal.

Modelos baseados em análise de custo-benefício e gradualidade

A adoção de infraestrutura avançada de medição também seguiu trajetórias mais prudentes, nas quais a autorização regulatória depende de resultados verificáveis em termos de custo e benefício. Nessa abordagem, a implantação não é concebida como um mandato universal desde o início, mas como um processo condicionado pelo desempenho técnico, econômico e operacional observado em pilotos ou estágios iniciais. Assim, o regulamento introduz mecanismos de revisão periódica, limites de escopo e critérios explícitos para a rentabilidade social, permitindo que os investimentos se ajustem ao ritmo de aprendizado e maturação tecnológica. Esse modelo é especialmente utilizado em jurisdições com alta sensibilidade aos custos de transição ou em estruturas institucionais que priorizam a avaliação de

impacto regulatório ex ante.

A Alemanha é um dos exemplos mais representativos. Sua Lei sobre a Digitalização da Transição Energética (2016) estabeleceu que a instalação de medidores inteligentes só seria obrigatória se uma certificação técnica e uma avaliação econômica confirmassem a adequação da implantação. A estratégia inicialmente focou em grandes consumidores, clientes com geração distribuída e segmentos críticos para a gestão do sistema, com um avanço deliberadamente gradual. A Irlanda adotou uma abordagem semelhante, começando com pilotos em escala regional e avaliações independentes de custo-benefício antes de autorizar sua implantação nacional. Esse processo culminou em 2017 com a aprovação da substituição progressiva de 2,4 milhões de medidores, executada entre 2019 e 2024, com exigências rigorosas de interoperabilidade e comunicação segura.

O Reino Unido seguiu uma lógica semelhante durante a primeira etapa de seu programa de medição inteligente. Embora um objetivo nacional ambicioso tenha sido definido, a implantação inicial foi regida por uma fase de transição dominada por pilotos, testes de interoperabilidade e a criação de uma entidade centralizada de dados (DCC, Data Communications Company) antes da autorização da massificação. Essa abordagem sequencial respondeu à necessidade de reduzir os riscos de integração tecnológica em um mercado varejista altamente competitivo e garantir que os custos finais para o consumidor refletissem benefícios tangíveis, como eficiência energética e participação em programas de resposta à demanda.

Embora esse tipo de estratégia reduza riscos financeiros e permita que a implantação seja adaptada à maturidade da tecnologia, ela também apresenta limitações evidentes na prática. Confiar em avaliações econômicas ex-ante pode atrasar significativamente o início da implantação, especialmente quando os benefícios da AMI são sistêmi-

cos e difíceis de captar na análise tradicional. Processos sequenciais de aprovação também geram heterogeneidade territorial e prolongam o período em que sistemas antigos e novos coexistem, aumentando os custos operacionais e a complexidade tecnológica. Essas dificuldades explicam por que várias jurisdições evoluíram para estruturas mais flexíveis e incentivos econômicos explícitos, que buscam acelerar a implantação sem necessariamente recorrer a mandatos universais.

Modelos híbridos e incentivos econômicos

A expansão da infraestrutura avançada de medição também seguiu estratégias que combinam flexibilidade regulatória com sinais econômicos claros. Nessa abordagem, a autoridade não impõe um mandato universal desde o início, mas projeta mecanismos de remuneração e incentivo que tornam a instalação de medidores inteligentes economicamente vantajosa tanto para empresas distribuidoras quanto para comercializadores e, em última instância, para os consumidores. Os instrumentos mais comuns incluem esquemas tarifários que reconhecem o custo do investimento, mecanismos TOTEX que nivelam decisões entre gastos de capital e despesas operacionais, plataformas de dados obrigatórias que multiplicam casos de uso e programas de resposta à demanda que permitem capturar benefícios operacionais. Essa lógica facilita a implantação progressiva, promove a inovação e reduz riscos regulatórios associados a decisões irreversíveis.

Os Estados Unidos fornecem exemplos representativos desse modelo. No Texas, a Comissão de Serviços Públicos aprovou um marco desde meados dos anos 2000 que autorizava a recuperação antecipada da tarifa dos investimentos na AMI e estabelecia uma sobretaxa específica para financiar a implantação. Esse projeto possibilitou a instalação de milhões de medidores em poucos anos sem a necessidade de uma exigência explícita. Além disso, a criação da platafor-

ma Smart Meter Texas facilitou o acesso a dados horários e possibilitou produtos inovadores de varejo. Nova York adotou uma abordagem distinta, mas igualmente híbrida, por meio da iniciativa Reformando a Visão de Energia. Lá, a AMI foi integrada como facilitadora de um mercado de flexibilidade e de um modelo operador de plataforma de distribuição, combinando incentivos de desempenho, regulação baseada em resultados e investimentos em AMI aprovados caso a caso, de acordo com sua contribuição para os objetivos de políticas públicas.

Em outros países, essa abordagem foi consolidada por meio de reformas regulatórias focadas na eficiência econômica. A Austrália exemplifica isso com a reforma liderada pela AEMC, que evoluiu de um esquema de livre escolha liderado por varejistas para um modelo com metas de substituição, recuperação clara de tarifas e processos coordenados entre distribuidores e comercializadores. Ontário, Canadá, também adotou uma estratégia orientada por incentivos: o regulador provincial integrou a AMI a um quadro regulatório baseado em desempenho, aprovou investimentos plurianuais com critérios de eficiência e articulou a medição inteligente com programas obrigatórios de tarifa horária. Em ambos os casos, a combinação de incentivos para o ciclo de vida completo, acesso aberto aos dados e metas regulatórias transparentes permitiu o progresso sem impor um cronograma universal desde o início.

Apesar de sua flexibilidade e capacidade de estimular a inovação, esse tipo de estratégia apresenta desafios que surgiram em sua implementação. A ausência de um mandato explícito pode se traduzir em velocidades desiguais de implantação entre empresas, gerando heterogeneidade territorial e uma transição prolongada entre tecnologias. A eficácia do modelo também depende da qualidade do desenho do incentivo: se os mecanismos tarifários ou de desempenho não estiverem alinhados com os benefícios sistêmicos da AMI, a adoção pode desace-

lerar ou se concentrar em segmentos mais lucrativos. Por essas razões, várias jurisdições complementaram esses esquemas com metas mínimas de instalação ou requisitos funcionais obrigatórios, convergindo para modelos mais estruturados quando a digitalização da rede se torna essencial para integrar recursos distribuídos e melhorar a gestão operacional.

Modelos orientados para eficiência operacional

A medição avançada também foi adotada como ferramenta para lidar com ineficiências operacionais persistentes em redes de distribuição caracterizadas por altos níveis de perdas, inadimplência, dificuldades de leitura e limitações na gestão comercial. Nessa abordagem, a AMI é concebida principalmente como uma ferramenta para melhorar a qualidade do processo de negócio, recuperar receita e obter informações detalhadas para localizar e reduzir perdas não técnicas. A regulamentação normalmente prioriza segmentos específicos considerados críticos e, em muitos casos, define critérios de segmentação geográfica ou funcional antes de avançar para implantações mais amplas. Esse modelo tem sido comum em países onde desafios operacionais condicionam a sustentabilidade financeira da distribuidora e onde os benefícios da AMI podem ser realizados de forma direta e quantificável.

A Índia oferece um dos casos mais ilustrativos. O Esquema do Setor de Distribuição Reformulado, lançado em 2021, estabeleceu metas obrigatórias de instalação de medidores inteligentes com pré-pagos integrados para cerca de 250 milhões de consumidores. O financiamento combina subsídios federais com contribuições estaduais e operacionais, condicionadas a reduções verificáveis de perdas e melhorias nas cobranças. Ao mesmo tempo, a instalação prioritária é promovida em áreas urbanas densas e áreas com perdas superiores a 15%, com funcionalidades obrigatórias como corte remoto, manuseio de alarmes e monitoramento de

carga em tempo real. Essa estratégia tornou possível agir rapidamente em estados onde faturamento e cobrança apresentavam déficits estruturais.

Na América Latina, o Brasil se destaca por usar a AMI de forma focada em segmentos de alto risco comercial, como áreas com grandes perdas ou clientes de difícil acesso. Diversas distribuidoras implementaram projetos-piloto ou implantações parciais com funcionalidades avançadas para detecção de adulterações, integração de pré-pagamento e monitoramento em tempo real de transformadores de BT. Em vários países da região, incluindo a América Central e o Cone Sul, empresas usaram esquemas semelhantes, priorizando áreas urbanas complexas ou registros com altas taxas de irregularidade. Embora essas implantações não tenham sido universais ou enquadradas por mandatos nacionais, elas levaram a melhorias significativas na medição, faturamento e controle de perdas.

Embora essa abordagem permita benefícios rápidos e mensuráveis, ela apresenta limitações significativas. Sua natureza focada pode perpetuar diferenças entre áreas atendidas por tecnologias avançadas e outras que continuam operando com sistemas tradicionais, dificultando o planejamento da rede de forma abrangente. Priorizar benefícios imediatos em detrimento das capacidades de longo prazo também pode restringir a evolução para usos mais avançados da AMI, como integração distribuída de recursos ou resposta flexível à demanda. Por fim, a dependência de retornos operacio-

nais diretos pode atrasar a expansão para segmentos onde os lucros são sistêmicos e menos visíveis nos balanços. Essas restrições explicam por que, mesmo em países que começaram a digitalização com foco na eficiência operacional, a discussão tende a evoluir para modelos mais amplos, com metas graduais e critérios de avaliação econômica que permitem uma transição para implantações universais.

A Tabela 5 resume essas quatro abordagens, reunindo suas principais características, países representativos, vantagens e limitações como referência para o desenho de políticas na região.



Tabela 5. Tipologias internacionais de modelos regulatórios para a implantação de infraestrutura avançada de medição.

Tipo de modelo regulatorio	Países representativos	Características centrales del enfoque	Ventajas principales	Limitaciones o riesgos
Mandato estatal con despliegue masivo	Italia, España, Suecia, Finlandia, Japón, Francia	Metas obligatorias de cobertura; plazos definidos; estándares funcionales uniformes; recuperación tarifaria asegurada; despliegue centralizado	Velocidad alta de instalación; estandarización funcional; cobertura universal; impacto sistémico inmediato	Requiere instituciones fuertes; alto costo inicial; menor flexibilidad local; riesgo de obsolescencia si se fija tecnología demasiado temprano
CBA y gradualidad	Alemania, Reino Unido (primera fase), Irlanda	Autorización condicionada a análisis costo-beneficio; pilotos previos; despliegue por segmentos; revisión regulatoria secuencial	Reduce riesgo financiero; permite pruebas antes de escalar; mayor adaptación tecnológica	Retrasos significativos; resultados heterogéneos; coexistencia prolongada de tecnologías; beneficios sistémicos subvalorados por análisis tradicionales
Modelos híbridos e incentivos económicos	Texas, Nueva York, Ontario, Australia post-reforma	Reconocimiento tarifario claro; incentivos TOTEX; señales económicas para inversión; plataformas de datos; regulación por desempeño	Fomenta innovación; ritmo flexible; alineación de incentivos; favorece competencia y nuevos servicios	Velocidad desigual entre empresas; riesgo de subinversión si incentivos no están bien calibrados; requiere madurez institucional y mercados activos
Modelos orientados a la eficiencia operativa	India (RDSS), Brasil en zonas críticas, varios países de América Latina	Focalización en pérdidas, morosidad y fallas del ciclo comercial; despliegue por zonas; funcionalidades avanzadas de control, corte remoto y detección de manipulación	Rápida captura de beneficios operativos; mejora de flujos de caja; reducción de pérdidas; mejor control en segmentos críticos	No genera cobertura universal; riesgo de fragmentación tecnológica; limitada habilitación de usos avanzados; transición difícil hacia AMI 2.0

FUNCIONALIDADES DA AMI E TENDÊNCIAS INTERNACIONAIS

Primeira onda de medição inteligente: funcionalidades centrais e implantações iniciais

As primeiras implantações de infraestrutura avançada de medição focaram em um conjunto limitado de funcionalidades essenciais voltadas para melhorar a medição, faturamento e monitoramento operacional básico. Nesta etapa, comumente chamada de primeira geração, os reguladores exigiam principalmente leitura remota automática, dis-

ponibilidade de dados horários ou de quinze minutos, possibilidade de corte e reconexão remota, e a detecção de interrupções usando sinais de última respiração. Essas capacidades reduziram os custos operacionais associados à leitura presencial, melhoraram a precisão do faturamento e forneceram informações mais oportunas sobre falhas de rede.

O momento dessa primeira onda variou conforme a região. Na Europa, as implantações iniciais ocorreram entre meados dos anos 2000 e meados da década seguinte, favorecidas por um processo de harmonização regulatória que, como mencionado na se-

ção anterior, consolidou progressivamente objetivos, requisitos funcionais mínimos e condições de interoperabilidade, reduzindo a incerteza para investimentos em grande escala. Nesse contexto, as diretivas da UE não apenas orientaram a adoção de funcionalidades básicas, mas também reforçaram uma lógica de planejamento e padronização de longo prazo, facilitando programas nacionais com maiores níveis de uniformidade e economias de escala. Nos Estados Unidos, a primeira onda acelerou após programas federais de estímulo entre 2009 e 2015, que permitiram que muitas empresas substituíssem seu parque de medidores por dispositivos que atendiam a esses requisitos básicos. O Japão fez progressos semelhantes a partir de 2012, integrando gradualmente a leitura remota e o corte remoto como capacidades obrigatórias, enquanto países como Austrália e Canadá avançaram de forma mais heterogênea e com cronogramas mais estendidos. Embora as tecnologias implantadas nessa fase fossem uma melhoria significativa em relação aos medidores eletromecânicos tradicionais, sua capacidade de permitir usos avançados, como integração distribuída de recursos ou gestão flexível de demanda, era limitada.

Segunda onda (AMI 2.0): Interoperabilidade, granularidade avançada e cibersegurança avançada

A segunda onda de medição inteligente, comumente chamada de AMI 2.0, surge à medida que as redes de distribuição incorporam recursos distribuídos, novos padrões de consumo e demandas crescentes em cibersegurança e gestão de dados. Ao contrário da primeira geração, focada na leitura remota e automação básica do ciclo comercial, essa nova etapa exige funcionalidades avançadas que permitam uma interação mais dinâmica entre o consumidor, a rede elétrica e os mercados de energia. Requisitos regulatórios comuns incluem maior granularidade de tempo (tipicamente entre cinco e quinze minutos), capacidades de processamento local ou edge computing,

portas ou interfaces que facilitam a interação com tecnologias domésticas inteligentes, medição bidirecional mais detalhada e fortalecimento de autenticação, criptografia e mecanismos seguros de gerenciamento de dados.

No caso europeu, a transição para o AMI 2.0 é interpretada como uma evolução coerente do arcabouço já descrito acima. Uma vez alcançados altos níveis de cobertura com a primeira onda, o foco regulatório muda da mera substituição do parque para a atualização do padrão funcional mínimo exigido pelo novo contexto de eletrificação e descentralização. Dessa forma, países que completaram implantações massivas, como Itália e Espanha, entram em ciclos de renovação tecnológica nos quais os requisitos regulatórios priorizam a interoperabilidade, maior granularidade dos dados e requisitos mais rigorosos de segurança e governança dos dados, com o objetivo de possibilitar casos de uso associados à flexibilidade, integração de RED e serviços avançados ao consumidor. e reduzir os riscos de fragmentação tecnológica e obsolescência precoce.

Em consonância com essa mudança de foco regulatório, vários países formalizaram requisitos avançados para seus novos ciclos de substituição e atualização tecnológica. A Itália iniciou essa transição em 2017 com a introdução de sua segunda geração de medidores, que incorporou padrões e funcionalidades de interoperabilidade mais rigorosos, voltadas para possibilitar serviços de flexibilidade. A Suécia seguiu na mesma direção a partir de 2020, afirmando que novos medidores deveriam incluir saídas locais, maior capacidade de armazenamento de dados e indicadores de qualidade de serviço. A França integrou requisitos semelhantes na implantação de versões atualizadas dos equipamentos do programa Linky, enquanto o Japão vem fortalecendo seus padrões técnicos desde 2020 para permitir a integração em massa da geração distribuída, armazenamento doméstico e operação mais automatizada da rede. Em outras jurisdições,

como a Austrália e vários estados dos EUA, os reguladores começaram a incorporar esses atributos em critérios de certificação ou aprovação para novos projetos de medição inteligente.

A transição para o AMI 2.0 responde a uma necessidade estrutural: a primeira geração de medidores permite maior eficiência operacional, mas não oferece as capacidades necessárias para gerenciar redes com alta penetração de recursos distribuídos ou com esquemas avançados de precificação dinâmica. Como resultado, países que começaram suas implantações há uma década estão entrando em um ciclo de modernização que não apenas substitui equipamentos antigos, mas redefine o padrão funcional mínimo necessário na próxima fase da transição energética. Para países que ainda não implementaram a medição inteligente em massa, essa evolução oferece uma oportunidade de adotar diretamente especificações de segunda geração, evitando estágios intermediários que podem levar à obsolescência precoce ou custos adicionais de atualização.

Funcionalidades exigidas de acordo com os usos priorizados por cada país ou região

A evolução da medição inteligente mostrou que não existe uma trajetória única ou conjunto de funcionalidades que seja ótimo para todas as jurisdições. Cada país priorizou o desenvolvimento das capacidades de AMI de acordo com seus desafios técnicos, econômicos e operacionais, resultando em diferentes perfis funcionais, mesmo que a tecnologia subjacente seja comparável. Em alguns casos, a ênfase tem sido fortalecer a eficiência do ciclo econômico e reduzir perdas não técnicas, enquanto em outros a prioridade tem sido permitir maior flexibilidade na demanda ou facilitar a integração de recursos distribuídos e veículos elétricos. Há também países que orientaram a medição inteligente para melhorar a resiliência e a qualidade do serviço, com foco especial na detecção precoce de eventos críticos e

na gestão automatizada da rede.

Quando a prioridade regulatória é redução de perdas e eficiência operacional, as funcionalidades mais relevantes geralmente são detecção de adulterações, cortes e reconexões remotas, monitoramento em tempo real de variações de carga e alarmes de comportamento anômalo. Esses atributos fortalecem a integridade do sistema de negócios e melhoram a sustentabilidade financeira das distribuidoras. Em jurisdições que buscam migrar para tarifas dinâmicas e programas de flexibilidade, ou que reconhecem a necessidade de superar esquemas tarifários monômios para capturar plenamente o valor econômico da medição inteligente, as principais capacidades estão relacionadas à medição granular, às comunicações bidirecionais de baixa latência e às plataformas de dados que permitem que consumidores e agregadores participem ativamente do mercado. Para facilitar a integração da geração distribuída e veículos elétricos, os reguladores priorizaram a disponibilidade de informações detalhadas sobre fluxos bidirecionais, interfaces locais para sistemas de gerenciamento residencial e funções que permitem a avaliação das condições de tensão e energia no ponto de conexão. Por fim, quando a política energética enfatiza resiliência e qualidade de serviço, as capacidades de registro de eventos, notificações automáticas de interrupções e capacidades de análise na borda da rede tornam-se mais relevantes.

Essas diferenças mostram que a América Latina pode ser incorporada diretamente à segunda onda de medições avançadas sem a necessidade de replicar mecanicamente as implantações iniciais de outras regiões. A adoção seletiva das funcionalidades próprias da AMI 2.0, alinhadas às prioridades de cada país e à maturidade de seus sistemas elétricos, possibilita evitar investimentos em tecnologias que se tornariam obsoletas no curto prazo e maximizar o retorno social da digitalização. O fundamental é definir padrões mínimos que sejam consis-

tentes com o uso pretendido da medição inteligente, deixando espaço para que a regulação evolua gradualmente à medida que a penetração dos recursos distribuídos, a eletrificação do transporte e novas dinâmicas de consumo transformam a operação das redes de distribuição.

BOAS PRÁTICAS INTERNACIONAIS E LIÇÕES PARA A AMÉRICA LATINA

Uma revisão da experiência internacional em contraste com a heterogênea realidade operacional da América Latina leva a uma conclusão fundamental: a tecnologia é universal, mas a regulação deve ser contextual. Enquanto a força motriz por trás da implantação da AMI na União Europeia foi a diretiva de eficiência energética e descarbonização, e nos Estados Unidos a gestão da demanda de pico predominou para adiar investimentos em geração, na América Latina os impulsores são múltiplos, já que coexistem concessões nas quais a prioridade é a recuperação da sustentabilidade financeira por meio do controle de perdas não técnicas com outras em que a penetração acelerada dos REDs (Recursos Energéticos Distribuídos) ameaça a estabilidade física da rede. Consequentemente, o sucesso da implementação depende da sofisticação com que o regulador projeta a arquitetura de incentivos. A seguir, algumas estratégias regulatórias diferenciadas e recomendações estruturais para o contexto regional são apresentadas.

Arquitetura de incentivos baseada na prioridade de mercado

Nas jurisdições onde a viabilidade da distribuidora é comprometida por níveis críticos de fraude, roubo e inadimplência, aplicar modelos regulatórios "empresa teórica eficiente" pode ser incompatível com uma implantação otimizada de AMI. Como a ADELAT argumentou em sua análise dos desafios regulatórios, é imperativo avançar para es-

quemas de remuneração baseados no reconhecimento dos custos reais, que capturem as condições operacionais efetivas em vez de impor parâmetros ideais (ADELAT, 2023).

Nesse sentido, a regulação pode ser baseada em uma análise custo-benefício do sistema para avaliar e priorizar investimentos. Nesse contexto, os investimentos intensivos por zonas e seu eventual reconhecimento na tarifa podem ser analisados considerando os benefícios agregados para o sistema como um todo (redução de perdas técnicas e comerciais, aumento do faturamento efetivo, adiamento dos investimentos na rede e melhorias na qualidade e continuidade do fornecimento) em relação ao impacto tarifário associado. Essa abordagem permite que decisões de investimento e mecanismos de recuperação de custos sejam justificados de forma transparente e proporcional, com avaliações verificáveis e revisões regulares.

Tecnicamente, essa abordagem exige uma mudança de paradigma na especificação do medidor, que deixa de ser um registrador comercial para atuar como um sensor de segurança de rede. Assim, a regulação pode priorizar as funcionalidades granulares de balanço de energia no nível do transformador de distribuição, a detecção algorítmica de manipulações físicas ou lógicas (adulteração) e a capacidade de cortar e reconectar remotamente imediatamente. A estratégia de implantação, portanto, não pode ser dispersa ou sob demanda do cliente, mas maciça e geográfica ("varredura de área"), blindando circuitos completos para garantir o fechamento do balanço energético.

Por outro lado, em mercados como Brasil, Chile ou Costa Rica, onde a geração fotovoltaica distribuída e a mobilidade elétrica começam a sobrecarregar redes de BT com fluxos bidirecionais e picos localizados de demanda, o desafio regulatório é gerenciar a complexidade. Aqui, o modelo de remuneração pode caminhar para valorizar a flexibilidade e os serviços de rede. Seguindo a lógica do marco RIIO (Revenue = Incentives

+ Innovation + Outputs) no Reino Unido ou do Reforming the Energy Vision (REV) de Nova York, a regulamentação pode reconhecer a AMI como a "espinha dorsal sensorial" da DSO. Sob essa perspectiva, o investimento em medição inteligente é justificado não pela economia na leitura presencial, mas pela capacidade de evitar investimentos de capital muito maiores em reforços tradicionais da rede. Essa abordagem exige que o regulador recompense o distribuidor por otimizar o uso da infraestrutura existente por meio dos dados.

Para operacionalizar esse modelo, é necessária a implementação de tarifas dinâmicas ou preços nodais. A regulamentação deve favorecer esquemas de Tempo de Uso (ToU) ou preços críticos que reflitam a escassez ou abundância de energia em tempo real. Isso também exige que a infraestrutura AMI tenha capacidade para processar e transmitir dados em intervalos de 15 minutos ou menos. Somente dessa forma o distribuidor pode enviar sinais econômicos eficientes para que os consumidores (ou seus sistemas automatizados) possam ajustar seu consumo ou injetar energia armazenada, transformando o medidor na ferramenta de liquidação financeira de um mercado de flexibilidade distribuída.

Regulação para AMI 2.0

Um dos riscos estratégicos mais sérios para as economias emergentes é a adoção de tecnologias maduras, mas funcionalmente obsoletas. Se os reguladores latino-americanos definirem requisitos técnicos com base em padrões da última década — cuja lógica era a leitura diária da cobrança mensal — eles poderiam condenar os sistemas de energia à irrelevância tecnológica antes que os ativos sejam amortizados. Portanto, é necessário que a regulação regional avance rapidamente ("salto") em direção aos padrões AMI 2.0.

Isso é importante, por um lado, por causa da latência e visibilidade. Gerenciar a intermi-

tência solar e a recarga de veículos elétricos requer visibilidade em tempo real. Os operadores de rede não conseguem estabilizar a tensão ou gerenciar congestionamento com dados do dia anterior - exigem telemetria com granularidade de segundos ou minutos. A regulamentação pode, portanto, exigir larguras de banda e latências nos canais de comunicação que suportam essa densidade de tráfego.

Segundo, por causa da arquitetura de "computação de borda". A regulamentação deve incentivar medidores que não apenas transmitam dados brutos para a nuvem, mas também possuam capacidade computacional local para executar algoritmos de detecção de falhas, análise da qualidade do produto e desagregação de carga no local. Isso não só reduz os custos de transmissão de dados, mas também melhora a cibersegurança e a privacidade ao minimizar a exposição das informações dos consumidores.

Por fim, pela regulamentação do canal local de consumidor. Seguindo o exemplo das regulamentações italianas, é importante que o medidor tenha uma interface de comunicação direta com o interior da casa (HAN, Home Area Network), independente da rede do distribuidor. Isso permite ao consumidor receber informações de consumo ou alertas em tempo real, possibilitando a automação residencial sem depender da conexão com a internet ou da nuvem do distribuidor.

Engenharia Regulatória: Recomendações para a América Latina

Para avançar nessas estratégias, são propostos quatro pilares de reforma regulatória, projetados para mitigar riscos regionais e acelerar a implantação eficiente.

Implantação progressiva por segmentos de valor: A experiência internacional mostra que mandatos universais e imediatos frequentemente falham devido a tensões na cadeia de suprimentos e resistência social. Recomenda-se uma abordagem passo a

passo por segmentos de valor. A regulamentação pode estabelecer fases obrigatórias iniciais para os consumidores onde o benefício econômico é indiscutível: grandes consumidores em BT, prosumidores com geração distribuída e áreas com perdas críticas. Essa estratégia permite validar a tecnologia, ajustar processos operacionais e gerar um fluxo de caixa positivo precoce para financiar as fases subsequentes de massificação residencial. Não obstante, essa progressividade deve estar inserida em uma trajetória explícita rumo a uma implantação total em horizontes de anos ou décadas, evitando a coexistência prolongada de sistemas convencionais e AMI, que aumenta os custos operacionais e torna a gestão mais complexa. As metas de cobertura devem ser explícitas, plurianuais e sujeitas a revisão, evitando a rigidez que leva ao descumprimento. Da mesma forma, quando forem habilitadas tarifas inteligentes, estas devem ser aplicadas com critérios de isonomia entre os clientes de uma mesma área de rede.

Reconhecimento tarifário das despesas totais: É importante reduzir o viés regulatório que favorece o CAPEX em relação ao OPEX e evoluir para modelos de Despesas Totais (TOTEX), onde a empresa é compensada por atingir os objetivos de serviço, independentemente de a solução ser física ou digital. Especificamente, é crucial que os reguladores permitam o reconhecimento na tarifa dos custos associados ao cérebro da AMI: licenças de software (MDM, HES), plataformas SaaS e serviços de cibersegurança. Enquanto a regulamentação continuar tratando esses custos como ineficiências operacionais, as distribuidoras terão incentivos para subinvestir em inteligência de sistemas, comprometendo sua segurança e funcionalidade a longo prazo.

Análise de Custo-Benefício com uma abordagem abrangente: Metodologias tradicionais de avaliação de projetos, focadas exclusivamente na redução dos custos internos da empresa, são insuficientes para justificar o AMI em muitos contextos da região. Os

reguladores devem ser guiados por análises de custos sociais que incorporem externalidades positivas. Isso envolve atribuir valor tangível à resiliência, à melhoria da qualidade do serviço, à segurança pública e à descarbonização. Além disso, ao quantificar as economias sistêmicas em geração e transmissão derivadas da eficiência energética e da resposta à demanda possibilitadas pela AMI, o business case será mais robusto e justificará socialmente o investimento tarifário.

Neutralidade tecnológica e padrões abertos: Por fim, para proteger o interesse do consumidor e a eficiência do mercado a longo prazo, a regulação deve ser neutra em termos de tecnologia de comunicação, mas exigente em termos de interoperabilidade. A adoção de padrões abertos na camada de aplicação deve ser um requisito para a entrada no mercado. Isso evita a dependência (lock-in) dos fabricantes com o fornecedor, garante que os investimentos atuais sejam compatíveis com as inovações de amanhã e promove uma competição saudável de preços em licitações de equipamentos, reduzindo o custo final repassado para a tarifa.



Um dos riscos estratégicos mais sérios para as economias emergentes é a adoção de tecnologias maduras

10

REFERÊNCIAS

Asociación de Distribuidoras de Energía Eléctrica Latinoamericanas (ADELAT). (2023). Desafíos y perfeccionamientos regulatorios de la distribución eléctrica para la transición energética latinoamericana.

Asociación de Distribuidoras de Energía Eléctrica Latinoamericanas (ADELAT). (2024). Digitalización y automatización de la distribución eléctrica: impulsores y buenas prácticas internacionales.

Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2025). Estructura de propuesta regulatoria: Consultor para proponer alternativas regulatorias para establecer las condiciones para la implementación de la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI) en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) (Entregable 1, GCG–CR–01).

Eurelectric. (2024). Power Summit 2024.

Inter-American Development Bank (IDB). (2023). Smart metering in Latin America and the Caribbean: Regulatory recommendations to encourage the deployment of smart metering appropriate to the needs of individual countries.

International Energy Agency (IEA). (2023a). Electricity grids and secure energy transitions: Enhancing the foundations of resilient, sustainable and affordable power systems.

International Energy Agency (IEA). (2023b). Unlocking smart grid opportunities in emerging markets and developing economies.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2025). Digitalisation and AI for power system transformation.

European Commission. (2023). Clean energy technology observatory: Smart grids in the European Union.

International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). Innovation landscape for smart electrification.

Ofgem. (2018). RIIO-2 Framework Decision: Our approach to setting price controls for GB gas and electricity networks. Office of Gas and Electricity Markets.

