

Advanced Metering Infrastructure for Industrial Natural Gas Smart Management

Everton C. Araujo, Nelson C. de Almeida and Eduardo P. Godoy

Abstract— One of the challenges within the utilities sector is the development of robust, scalable and low-cost methods for the remote management of customers usage and billing. Considering the advances related to the Internet of Things (IoT), an Advanced Metering Infrastructure (AMI) is the basis for utilities smart management. This AMI bring together the automation of remote metering and communication infrastructures with the processing and analysis of distributed data using advanced techniques and cloud computing. This paper presents the development of an AMI for the smart management of natural gas industrial customers using IoT. The AMI architecture is based on the LoRaWAN communication for remote metering and a cloud-based smart management system including supervisory control, continuous monitoring, anomalies detection and alarm notification. Experimental results shown the LoRaWAN fulfilled the communication requirements for industrial natural gas metering and the smart management system can analyze historical data and detect anomalies in gas consumption.

Index Terms— Internet of Things; Natural Gas Measurement; LoRaWAN; Anomaly Detection.

I. INTRODUÇÃO

O setor de utilities é composto por empresas que fornecem serviços públicos essenciais para a sociedade, como o fornecimento de água, energia elétrica, gás, saneamento, telecomunicações e gerenciamento de resíduos. Um dos desafios para essas empresas está na medição e faturamento remoto de seus clientes através de uma solução robusta, confiável, simples e de baixo custo. É sabido que o faturamento de clientes é realizado na maioria dos casos de forma tradicional, em que é necessária a visita em cada ponto de medição para a leitura dos medidores [1]. Dentro do segmento industrial, outro fator que pode agravar o problema no faturamento é o controle de acesso que as empresas possuem, o que pode aumentar significativamente o tempo para se ter acesso ao medidor para coleta dos dados de faturamento [2].

Um método que tem sido aplicado consiste na integração de um dispositivo eletrônico com tecnologia de telefonia móvel ao medidor. Este dispositivo coleta os dados de consumo e os envia a uma central através de comunicação GPRS, 3G ou 4G. O problema desta solução é que geralmente os dispositivos considerados não são nativamente criados para esta aplicação, o que elevava seu custo de implementação. Outra desvantagem do uso dessas soluções é o alto custo envolvido na contratação de redes de telefonia móvel em aplicações massivas [3].

Tendo em vista a expansão das redes sem fio LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), a área de faturamento remoto de clientes tem ganhado grande foco no desenvolvimento de soluções utilizando Internet das Coisas (IoT) [3].

Atrelado aos avanços proporcionados pela IoT, uma Infraestrutura Avançada de Medição (*Advanced Metering Infrastructure - AMI*) é a base para qualquer solução de gestão inteligente de utilities, congregando a automação da medição remota de medidores e de infraestruturas de comunicação com o processamento e análise de dados geograficamente distribuídos usando técnicas avançadas [4].

No campo de medição industrial de gás natural [5] no Brasil, a aplicação de AMI ainda é incipiente e pode trazer benefícios que justificam a sua implementação, como a análise assertiva do perfil de consumo de clientes e previsão de demanda, o faturamento remoto do consumo que atualmente é realizado fisicamente, a detecção de medidores com operação inadequada e a detecção de fraudes e vazamentos de gás natural.

Considerando o cenário de utilities no Brasil, este trabalho consiste no desenvolvimento de uma AMI para medição fiscal de gás natural no segmento industrial. A rede LoRaWAN é analisada como solução de comunicação LPWAN para a AMI. Além da medição remota, a AMI realiza a análise dos dados de medição para determinar o perfil de consumo de clientes e detectar comportamentos atípicos ou anômalos no processo.

Este artigo é apresentado da seguinte forma: a seção II apresenta uma revisão sobre aplicações da rede LoRaWAN dentro da área de utilities, vantagens e oportunidades. A descrição da arquitetura de AMI usando IoT e LoRaWAN é apresentada na seção III. A seção IV valida experimentalmente a solução e discute suas funcionalidades de análise de dados. A seção V apresenta uma discussão sobre o artigo. As conclusões e contribuições são elencadas na seção VI.

II. CENÁRIO BRASILEIRO EM AMI EM UTILITIES

A arquitetura de uma AMI para gestão de utilities é composta por três elementos [6]: medidor inteligente (automação do processo de medição, aquisição mais frequente e de variadas informações do processo), infraestrutura de comunicação bidirecional (rede sem fio de longa distância, baixo consumo de energia e custo) e sistema de gestão de dados (infraestrutura computacional sob demanda para visualização e gestão, análise de dados e detecção de anomalias). Entre esses elementos, como o processo de medição é bastante consolidado, o desafio e diferença entre soluções distintas se encontra na comunicação e nas funcionalidades do sistema de gestão de dados [4].

Além disso, a concepção da AMI está atrelada à aspectos geográficos, tipo de aplicação, desenvolvimento tecnológico, disponibilidade de telecomunicação e requisitos de operação. O cenário brasileiro alvo deste trabalho impõe restrições importantes em relação a esses aspetos. A amplitude geográfica do Brasil inviabiliza desenvolvimentos privados em infraestrutura para implantação da AMI como acontece na Europa. Quando comparado à outros locais de maior amplitude

This research was supported in part by the Companhia de Gás de São Paulo (Comgás).

E.C. Araújo, N.C. Almeida, E. P. Godoy are with São Paulo State University (Unesp), Sorocaba, SP, 18087-180, Brazil (eduardo.godoy@unesp.br).

como os Estados Unidos, restrições tecnológicas e disponibilidade de telecomunicação podem impactar a definição da solução de comunicação mais indicada para a AMI. O tipo da aplicação da AMI, se ao usuário final (residencial) ou industrial também influenciam o desenvolvimento da AMI. Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa não é comparar a AMI proposta em relação à literatura, mas sim discutir como nossa proposta contorna essas restrições para desenvolvimento de uma solução efetiva para gestão de gás natural no segmento industrial no Brasil.

A comunicação nas AMI existentes são baseadas em soluções proprietárias (não abertas) de comunicação via rádio frequência (RF) e/ou GPRS via telefonia móvel [4]. Essas soluções não fornecem interoperabilidade e necessitam de infraestrutura privada, impactando em alto custo de instalação e uso para a AMI e inviabilizando seu uso em soluções mais simples [7]. As novas tecnologias de comunicação sem fio LPWAN como o LoRaWAN, SigFox e NB-IoT, combinam os principais requisitos para essas aplicações de AMI: longo alcance de transmissão, baixo consumo de energia e baixo custo [8]. Diversos estudos têm investigado essas LPWAN em relação às suas capacidades de suportar as AMIs em termos de escalabilidade, capacidade de transmissão de dados, consumo de eletricidade, entre outros [2][5][8][9].

O SigFox possui vantagem em relação à escalabilidade, devido ao grande número de dispositivos que podem ser conectados numa mesma antena. No entanto, o alto custo de implantação pode ser um fator impeditivo. Além disso, o SigFox suporta baixa frequência de transmissão (poucas mensagens/dia) e baixa quantidade de dados (até 12 bytes no *payload*), o que inviabilizam seu uso em diversas aplicações [8]. O NB-IoT faz uso de infraestrutura de telefonia móvel para comunicação, proporcionando uma vantagem em relação à amplitude de conectividade existente [5]. No entanto, o custo de transmissão de mensagens é o maior entre as soluções, impactando em soluções massificadas, com grande densidade de pontos ou com transmissão de grande quantidade de dados [2]. O LoRaWAN pode ser visto num meio termo entre as outras soluções. É uma solução que usa espectro de RF aberto não licenciado (como o SigFox) e com boa flexibilidade de frequência e tamanho de dados, possibilitando a criação de área de cobertura de rede sem custo de transmissão de dados [9]. No entanto, a distância de comunicação é menor (em relação ao NB-IoT) e a quantidade de dispositivos conectados por *gateway* é menor, o que pode impactar na necessidade de uma infraestrutura maior para prover a mesma conectividade [5].

No cenário brasileiro na área de eletricidade, os casos de AMI são conhecidos e estão bem avançados quando comparados com as demais *utilities*. Um fator que contribui é o medidor já possuir eletricidade, facilitando a adição de sistemas eletrônicos e de comunicação. A CPFL implementou uma AMI na cidade de Jaguariúna considerando medidores de energia elétrica distribuídos em 4 tecnologias: LoRaWAN, PLC, Mesh e LTE [10]. Na área de distribuição de água, as soluções AMIs têm sido desenvolvidas em escala e velocidade menores que o setor de eletricidade, principalmente devido ao problema de ausência de alimentação elétrica no medidor. A SABESP iniciou a

implementação de uma AMI usando IoT, que conta com mais de 100.000 medidores de água distribuídos na região de São Paulo operando com rede LoRaWAN [11]. Na área de distribuição de gás, a implementação de AMI está menos avançada e em sua maioria focada em clientes residenciais. A Comgás conta com mais de 70.000 medidores numa AMI para medição remota de gás usando comunicação LoRaWAN [12].

Constata-se em relação à comunicação que, apesar da adoção de soluções diversas de LPWAN em aplicações de *utilities* no exterior [3][4], no Brasil as soluções de AMI têm focado no LoRaWAN. Os aspectos de restrição tecnológica e disponibilidade de telecomunicação justificam isso, pois o SigFox pouco se desenvolveu no país. Além disso, o uso do NB-IoT ficou atrelado à demora da sua adoção como padrão por operadoras de telefonia móvel no país e impactado pela regulamentação tardia (2022) do espectro de frequências do 5G. Outro aspecto que justifica isso é a amplitude geográfica. A disponibilização no país da rede neutra LoRaWAN pela empresa de telecomunicações American Tower (ATC) [13] fornece cobertura LoRaWAN comercial, com conectividade de baixo custo e sob demanda, o que evita a necessidade de custos com a criação de uma infraestrutura privada pelo fornecedor da AMI.

O uso de técnicas avançadas para gestão de AMIs em *utilities* ainda é bastante incipiente [4], principalmente na área de gás natural. As AMIs existentes são baseadas em soluções passivas focadas na automação da medição e no monitoramento remoto dos dados. O potencial comprovado e ainda não explorado em AMI dessas técnicas demandam a migração dessas soluções para uma nova abordagem ativa orientada à dados, focada nesta pesquisa e a qual objetiva a obtenção de informações aprimoradas para a gestão inteligente, como identificação de padrões de consumo e detecção de anomalias [14].

Considerando o cenário apresentado, é possível verificar que no Brasil o maior foco se encontra na implementação de comunicação IoT para troca do método tradicional de medição por AMI, do que em relação à utilização da informação para gestão e gerar inteligência ao negócio [15]. Neste contexto, esta pesquisa contribui principalmente em dois pontos ao descrever a arquitetura e apresentar o desenvolvimento de uma AMI para gestão do consumo de gás natural em clientes industriais.

A primeira contribuição diz respeito à análise de uso do LoRaWAN como solução de comunicação para a AMI. O foco de aplicação industrial deste artigo difere da solução de AMI para o caso de clientes residenciais, pois é necessária uma maior frequência de transmissão de dados para permitir a análise de dados e a transmissão de uma maior quantidade de dados devido às variáveis a serem medidas nesse tipo de aplicação. A segunda, em relação às soluções de AMI existentes, está na implementação da gestão inteligente do consumo de gás natural através da análise de dados históricos de consumo, análise do perfil de cliente e na detecção de anomalias.

III. INFRAESTRUTURA AVANÇADA DE MEDIÇÃO (AMI)

A. Descrição da Arquitetura

A aplicação de AMI em clientes industriais se difere bastante da aplicação tradicional em clientes residenciais, trazendo uma

nova vertente para esta pesquisa. Para clientes residenciais, somente o valor de consumo do insumo (ex: gás natural) é considerado e há uma massificação da solução, a qual é a mesma implantada para vários cliente localizados numa mesma área. Os mesmos dados e análises são realizadas. No caso de cliente industriais, ao contrário da massificação, há a customização da solução para cada cliente. Além disso, os clientes estão localizados numa área mais ampla (maior infraestrutura) e a medição fiscal incorre na obtenção de diferentes dados e diferentes análises a serem realizadas. Isso deve-se pela complexidade do processo que considera a correção de volume de gás natural com base nas variáveis físico-químicas do fluido e nas suas condições de operação.

No caso da medição fiscal de gás natural de clientes industriais é necessário por norma realizar a coleta das seguintes variáveis do processo: Pressão, Temperatura, Vazão, Volume Corrigido, Volume Não Corrigido, Fator Z e Fator de Correção. Adicionalmente, nesta pesquisa também foram incorporadas as seguintes variáveis: Geolocalização, Detecção de violação do equipamento de medição e Nível de bateria.

No processo de medição, o corretor ou conversor de volume de gás tipo PTZ é o equipamento fiscal e regulamentado que garante que o processo de custódia de gás natural seja realizado conforme as práticas normativas vigentes [16]. Esse equipamento é conectado aos instrumentos de medição de pressão, temperatura e vazão alocados no local de custódia do cliente para a correção de volume de gás natural medido.

A arquitetura da *AMI* para gestão inteligente de gás natural em clientes industriais mostrada na Fig. 1 é composta de quatro elementos: corretor de volume de gás PTZ, hardware eletrônico de aquisição de dados e comunicação, servidor de rede *LoRaWAN* e plataforma de *IoT* da *ProIoT*.

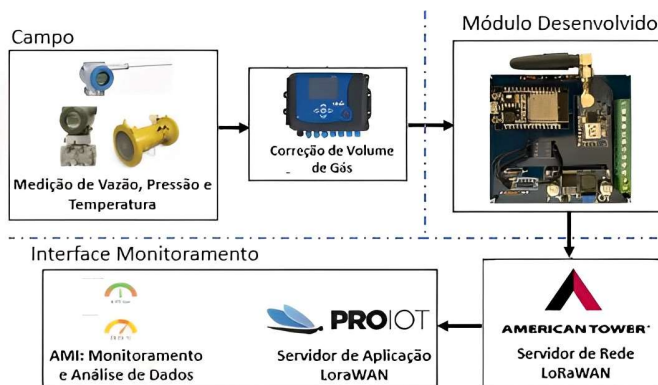


Fig. 1. Arquitetura da *AMI* para gestão de gás natural em clientes industriais

Todas as informações do processo de medição fiscal de gás natural são obtidas do corretor de volume PTZ. Essas informações são obtidas por um hardware eletrônico com microcontrolador e rádio de comunicação *LoRaWAN*. Este dispositivo coleta os dados das variáveis do processo do PTZ através do protocolo de comunicação *Modbus RTU* e por sinais digitais e os transmite através da rede *LoRaWAN*.

A rede *LoRaWAN* utilizada na *AMI* é uma *LPWAN* para aplicações de *IoT*. Na camada física, o protocolo *LoRa* utiliza a modulação de rádio tipo *CSS (Chirp Spread Spectrum)* que fornece um baixo consumo de energia, grande alcance de

comunicação e robustez contra interferências [17]. *LoRaWAN* diz respeito ao protocolo de rede, operando numa arquitetura estrela com conexão dos dispositivos aos *gateways* e dos *gateways* aos servidores [18]. Os *gateways* são os responsáveis pela comunicação bidirecional com os dispositivos. O servidor de rede é responsável por gerenciar a rede *LoRaWAN* e controlar a conexão segura dos dispositivos. O servidor da aplicação é responsável por gerenciar os dados provenientes dos dispositivos e prover acesso à essas informações.

Numa aplicação tradicional de *AMI* com *LoRaWAN*, todos esses elementos (dispositivos, *gateways* e servidores) geralmente são providos pela empresa fornecedora de *utilities*. No entanto, nessa pesquisa o foco da *AMI* é para clientes industriais, na qual há baixa densidade de pontos medição por localidade. Como há poucos clientes industriais numa mesma localidade e a custódia fiscal de gás representa somente um ponto de medição na entrada da empresa, não há interesse viabilidade da empresa de *utilities* (nesta pesquisa a Comgás) na implantação de infraestrutura *LoRaWAN* própria.

Como consequência, para a *AMI* desenvolvida (Fig. 1) foi utilizada a cobertura de rede *LoRaWAN* da ATC [13]. A ATC fornece o servidor de rede *LoRaWAN*, do qual podem ser adquiridos pacotes de conectividade *LoRaWAN* para dispositivos. Essa conectividade foi adquirida da empresa *ProIoT* [19], a qual além de fornecer o servidor de aplicação *LoRaWAN*, ainda fornece uma plataforma de *IoT* para criação da interface de monitoramento e análise de dados da *AMI*. Essa interface opera na nuvem, facilitando seu acesso e utilização.

Outra vantagem do uso da plataforma *ProIoT* para a solução de *AMI* é a possibilidade de contratação de conectividade *LoRaWAN* customizada de acordo com os requisitos da aplicação e do cliente (ex: quantidade de mensagens diárias). Pelo fato de o *LoRaWAN* ser uma rede aberta e não licenciada, essa conectividade tem custo bastante baixo e inferior às outras soluções de *LPWAN* [7]. Finalmente, o uso da rede neutra ATC e *ProIoT* permitiu à empresa fornecedora de gás natural o oferecimento da *AMI* como um serviço, de forma flexível, escalável e customizada para cada cliente, e sem a necessidade de implantação de infraestrutura própria para comunicação e TI. Este é um resultado importante da *AMI* desenvolvida.

Em relação à solução de *AMI* da Fig. 1, o único elemento extra adicionado no cliente industrial é o hardware eletrônico, que representa o dispositivo *LoRaWAN*. Esse hardware, cujo detalhamento técnico foi adicionado como material complementar deste artigo, foi alocado num invólucro próprio, acoplado e alimentado pela bateria do corretor de volume PTZ como mostrado na Fig. 2.



Fig. 2. *AMI* instalada em parceiro. Destaque para invólucro do dispositivo *LoRaWAN* acoplado ao corretor de volume de gás natural. *QR Code* fornece acesso à interface de gestão inteligente da *AMI*

B. Gestão Inteligente de Gás Natural

A gestão inteligente da AMI é realizada através de uma interface de monitoramento e análise de dados do cliente industrial desenvolvida na plataforma ProIoT [19]. A ProIoT permite a criação de interfaces (dashboards) vinculadas aos dados das variáveis recebidas via LoRaWAN. Além disso, essa plataforma permite a criação de scripts para análise de dados históricos recebidos do dispositivo LoRaWAN e armazenados. A gestão inteligente de gás contempla as seguintes funcionalidades: monitoramento contínuo e histórico do processo, gestão de perfil de consumo do cliente e avaliação de anomalias de consumo e detecção de possíveis vazamentos. Essas informações são apresentadas em painéis de dados na interface online de gestão.

A Fig. 3 apresenta o painel de dados gerais do cliente, onde informações como local de instalação, nível de bateria do corretor de gás, tipo de medidor usado e volume de gás natural contratado pelo cliente podem ser acessadas pelo usuário.



Fig. 3. Dados gerais do cliente apresentados na AMI

O painel de dados online da Fig. 4 apresenta o monitoramento contínuo das variáveis de processo da AMI através de gráficos e indicadores numéricos, facilitando a visualização. Neste painel são apresentadas todas as informações requeridas do processo de medição fiscal de gás natural (seção III.A). Ambos os painéis anteriores representam as interfaces de monitoramento de dados remotos da AMI. A gestão inteligente foi desenvolvida conforme demanda da empresa fornecedora de gás parceira (Comgás) e realiza a análise de dados históricos do processo.

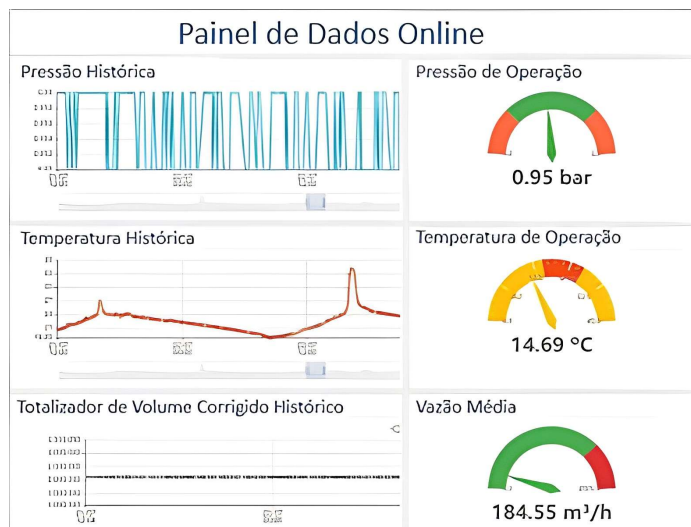


Fig. 4. Monitoramento de dados contínuo na AMI

O painel da Fig. 5 apresenta os dados históricos armazenados

na plataforma ProIoT. Para as análises deste artigo foram utilizados dados de um período de 30 dias (mensal). Neste painel, as variáveis do processo são processadas e calculadas novas variáveis para análise histórica (variável média, máxima e mínima, consumo horário, diário e mensal) e entendimento da operação do ponto de medição.

A gestão inteligente realiza a análise de dados históricos a partir de scripts implementados na plataforma. Isso permite agregar valor à solução de AMI através da geração de informações sobre o negócio, inexistentes antes da implementação da AMI. As mensagens LoRaWAN provenientes do módulo de medição são recebidas, interpretadas e as informações armazenadas na ProIoT. Utilizando os próprios recursos disponíveis na ProIoT, os scripts disponíveis permitem que estas variáveis históricas (ex: 1 dia, 30 dias) possam ser consultadas e analisadas em conjunto e inseridas em lógicas de comparação, onde novas variáveis foram geradas para avaliação assertiva dos dados de processo.



Fig. 5. Monitoramento de dados históricos na AMI

Algumas funcionalidades de gestão inteligente desenvolvidas incluem a análise operacional dos medidores (operação dentro dos limites e faixas operacionais permitidos), a análise do perfil de consumo do cliente a fim de garantir que a estação de medição está adequada para transferência de custódia e a análise do consumo de gás natural em relação ao valor contratado no período. Essas informações são apresentadas na AMI no painel da Fig. 6. Nele é possível avaliar se os valores de pressão, vazão e consumo estão adequados de acordo com a aplicação, verificar se existem possíveis vazamentos na instalação e tentativas de fraude via acesso físico ao corretor de volume de gás natural (equipamento fiscal). Uma descrição mais completa dessas funcionalidades de gestão é apresentada na próxima seção de testes operacionais (IV.B).

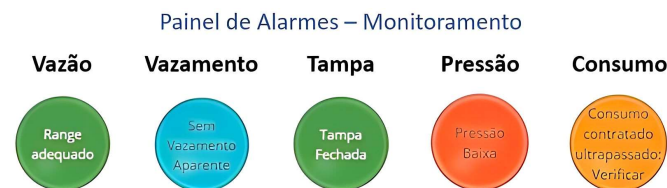


Fig. 6. Monitoramento de Alarmes e Anomalias na AMI

IV. GESTÃO DO CONSUMO DE GÁS E VALIDAÇÃO OPERACIONAL DA AMI

A AMI para gestão inteligente de gás natural desenvolvida foi colocada em testes de operação em um parceiro (Fig. 2). Na primeira parte da validação experimental, uma análise de adequação da comunicação *LoRaWAN* para a AMI foi realizada. Na segunda parte, diversos cenários de operação, incluindo com anomalias simuladas para verificar as funcionalidades de gestão inteligente desenvolvidas, foram contemplados.

A. Análise da Comunicação *LoRaWAN*

Em relação à comunicação para a AMI, os seguintes requisitos foram definidos pela empresa fornecedora de gás: 1) frequência mínima de transmissão de dados de 2x/h (ou 48x/dia) para monitoramento contínuo e análise de dados; 2) Transmissão de todas as variáveis do processo descritas (seção III.A), que correspondem a um *payload* de 77 bytes por mensagem. Dessa forma, é necessário avaliar a adequação de uso do *LoRaWAN* na AMI. Além dos requisitos citados, outros como cobertura e confiabilidade de comunicação, custo e consumo de energia também são geralmente analisados [20].

Em relação aos requisitos definidos pela empresa parceira, a frequência mínima de comunicação é suportada pelo *LoRaWAN*, incluindo a flexibilidade de customização do número de mensagens pela *ProLoT*. Considerando o *payload* mínimo da mensagem, foi necessário ajustar o parâmetro *DataRate* da comunicação *LoRaWAN* para a opção 3, o qual possui o *Spreading Factor* (SF) 9/125 KHz e *payload* máximo de 115 bytes por mensagem. No Brasil, o parâmetro *DR* pode ser configurado nos valores 0,1 e 2 (*payload* de 51 bytes), *DR* = 3 (115 Bytes) e *DR* = 4,5 e 6 (222 bytes). Os parâmetros SF e *DR* do *LoRaWAN* fornecem uma relação entre a quantidade de dados que pode ser enviada em cada mensagem e o tempo de transmissão (*airtime*) dessa mensagem. Quanto maior o *DR* (e o *airtime*), maior é a distância (área de cobertura) de comunicação entre o dispositivo e o *gateway LoRaWAN*. No entanto, quanto maior o *airtime* de cada mensagem, mais tempo (e maior consumo de energia) é utilizado do *gateway* para cada transmissão. Consequentemente, nessa condição um menor número de dispositivos *LoRaWAN* será capaz de se comunicar com um mesmo *gateway*. Portanto, a escolha adequada do *DR* para a comunicação *LoRaWAN* é importante.

Em relação aos outros parâmetros de análise, a área de cobertura de comunicação *LoRaWAN* provida pela rede neutra ATC é compatível com a demanda da empresa fornecedora de gás parceira. Durante os testes da comunicação *LoRaWAN*, as mensagens enviadas pelo módulo *LoRaWAN* e recebidas pela *ProLoT* foram analisadas a fim de calcular taxa de entrega de mensagens da AMI. Nesses testes operacionais considerou-se um período superior a 30 dias de envio de dados, o que totaliza mais de 2.000 envios de informação. Dado que a comunicação opera através de rádio frequência, verificou-se que a rede é sujeita a interferências externas como fatores climáticos, topográficos e manutenções programadas por parte da ATC em gateways *LoRaWAN*. Como exemplo, verificou-se que 2 gateways em distancias diferentes eram geralmente usados na área do teste. Desta forma, houveram períodos onde a taxa de entrega variou, porém em média obteve-se um índice de 95% de mensagens entregues com sucesso, comprovando sua

confiabilidade para a aplicação. Esse resultado se restringe aos testes realizados e a implementação da AMI em outras localidades estaria sujeito à outras condições.

É importante lembrar que a aplicação para clientes industriais possui menor densidade de pontos de medição por localidade do que uma aplicação residencial, o que justifica a escolha da cobertura de rede fornecida pela ATC, evitando-se assim a necessidade de gastos com infraestrutura de rede por parte das empresas de fornecimento de gás natural. O consumo de energia não foi mensurado, porém o dispositivo *LoRaWAN* desenvolvido possui baixo consumo de energia e é alimentado pela bateria interna do corretor de volume (Fig. 2). Para isso, implementou-se o dispositivo *LoRaWAN* como Classe A, que fornece o menor consumo energético através da desativação do rádio, e o microcontrolador do dispositivo com modo de operação em baixo consumo de energia (*sleep*) durante os intervalos de medição e transmissão.

Considerando as análises descritas, é possível comprovar que a rede *LoRaWAN* é uma solução de comunicação adequada para a AMI. Adicionalmente, em relação à possibilidade de uso de outra *LPWAN* junto à AMI, pode-se comentar que a rede *SigFox* não cumpriria alguns requisitos especificados, dado que seu *payload* possui tamanho e frequência de envio inferiores aos necessários. Avaliando os aspectos técnicos, a rede *NB-IoT* atenderia aos requisitos da AMI, porém avaliando-se os aspectos comerciais, ela possui maior custo para utilização (atualmente no Brasil, o custo de transmissão de mensagens e o custo de hardware é maior para o *NB-IoT*).

B. Experimentos e Cenários de Teste

Apesar da solução de AMI ter sido testada em parceiro, não seria possível submeter uma estação de medição fiscal de gás natural num cliente industrial à todas as condições de operação, principalmente às de anomalia. Para a realização desses testes de anomalia foi utilizado um simulador para geração de dados do processo similares aos gerados por um corretor de volume de gás instalado em campo. Os sinais gerados foram enviados ao corretor de volume de gás, que por sua vez foi conectado à solução desenvolvida para análise das funcionalidades e validação operacional da AMI para gestão inteligente de gás. Nesse simulador também foram utilizados dados históricos reais conhecidos de uma estação de transferência de custódia de gás natural e dados simulados (outras condições de operação e de anomalias), em diversos cenários a fim de garantir a robustez operacional da AMI.

Conforme a Tabela I, o cenário de testes contemplou a operação e as funcionalidades de gestão inteligente desenvolvidas na AMI: teste de estresse e análise operacional, análise do perfil de consumo do cliente, análise e detecção de violação do corretor de volume de gás e detecção de vazamento, sendo que a AMI foi aprovada em todos os testes.

O teste de estresse operacional objetivou a comprovação de que a AMI não afetaria o processo de medição fiscal existente e seus resultados evidenciaram a viabilidade e confiabilidade de uso da AMI para medição de gás natural dentro das indústrias.

Considerando que os medidores em campo possuem limites operacionais (mínimos e máximos) recomendados pelo fabricante, e sua operação fora destes limites pode gerar erros de medição superiores aos permitidos normativamente. As

análises do perfil de vazão e de pressão consistiram na simulação de operação fora desses limites a fim de verificar a notificação de operação anômala. A operação de um cliente fora dos intervalos adequados de pressão e vazão pode gerar a avaria prematura e falha dos equipamentos e a necessidade de manutenções corretivas. A gestão de perfil de consumo do cliente industrial é implementada através de um script que consulta os dados armazenados na ProIoT e compara as condições atuais do processo em relação às condições normatizadas, com a notificação de alarme das anomalias encontradas.

TABELA I
RESUMO DOS EXPERIMENTOS E CENÁRIOS DE TESTES DA AMI

Teste	Objetivo	Condição de Teste
Estresse operacional	Avaliação operacional da AMI em toda a sua faixa de operação	Varição em toda a faixa de operação
Análise de Perfil de Vazão	Avaliação da operação fora dos intervalos de vazão normatizados para o medidor de gás natural	Operação dentro e fora da faixa de operação
Análise de Perfil de Pressão	Avaliação da operação fora dos intervalos de pressão de operação	Operação dentro e fora da faixa de operação
Análise do Perfil de Consumo	Avaliação da operação constante por grandes períodos	Operação do sistema por 30 dias em condição normal de uso
Detecção de Violação de Equipamento	Simulação de violação física do corretor de volume de gás	Teste de abertura da tampa física do corretor de volume de gás
Detecção de Possível Vazamento	Simulação de operação com baixa vazão contínua de gás	Consumo mínimo constante em 1,0 m ³ /h (0,1% escala)

É conhecido que o faturamento incorreto de gás natural, ou o não faturamento, implica em potenciais prejuízos financeiros à empresa fornecedora de gás. Dado que o corretor de volume de gás é um equipamento fiscal, ele pode ser alvo de violações físicas a fim de omitir o real consumo de gás de uma instalação. Para isso, os instrumentos já possuem um selo metrológico que é instalado em sua tampa. Caso este selo seja rompido, há indício de tentativa ou acesso indevido ao instrumento. Desta forma, como redundância a esta proteção, foi considerado **teste de detecção de violação** através de um sensor na tampa do corretor de volume de gás com notificação de alarme, evitando se assim potenciais prejuízos no faturamento de gás natural.

Uma das funcionalidades mais almeçadas dentro da área de distribuição de gás natural é a de prevenção contra vazamentos. Diante dessa demanda, a gestão inteligente de gás da AMI considerou um método de **detecção de possível vazamento**. A gestão de possíveis vazamentos avalia condições em que o consumo de gás natural é inferior ao consumo do equipamento que menos consome gás dentro da instalação. Essa regra é implementada via script que compara dados históricos do consumo de gás em relação à condição definida, com a notificação do possível vazamento. Ressalta-se que este método de detecção foi baseado em conhecimento prévio da empresa fornecedora de gás parceira, obtidos através da análise de dados empíricos de medição de gás natural, que constatou que o consumo constante de gás natural em faixas de vazão baixas pode indicar a presença de pontos de vazamento no sistema. Cabe ressaltar que esse método não garante que o consumo baixo efetivamente seja um vazamento de gás natural. Porém,

ele tem sido usado, de forma offline pela empresa, pois sua utilização pode trazer ganhos financeiros significativos, além de agilizar a detecção e correção dessas anomalias.

Finalmente, outra funcionalidade de gestão implementada na AMI foi a **análise do perfil de consumo em relação ao contratado**. Essa análise do consumo de gás pelo cliente possibilita a otimização do procedimento de compra do gás natural, originando ganhos ao cliente e à fornecedora de gás através da redução de desperdícios e custo. O processo de compra do gás é baseado em demanda, de forma que, diariamente, tanto o cliente compra da empresa fornecedora a quantidade de gás que espera consumir, quanto a empresa fornecedora compra da companhia de distribuição (ex: Petrobras) a quantidade de gás que espera fornecer aos seus clientes. Desta forma, o acesso a essa informação é de extrema valia, pois o consumo de valores diferentes do contratado pode gerar desperdício ou multas operacionais, dado que o previsto não foi atingido. Essa gestão inteligente é implementada através de um script que processa dados históricos de consumo do cliente armazenados, comparando com o valor contratado.

V. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A arquitetura da AMI para gestão de gás natural é composta, além do corretor de volume de gás presente no processo, pelo dispositivo eletrônico de aquisição de dados e comunicação, pelo servidor de rede *LoRaWAN* e pela plataforma de *IoT* da *ProIoT*. O único elemento presente fisicamente no cliente é o dispositivo *LoRaWAN*, o que facilita a implantação da AMI. Para o servidor de rede *LoRaWAN* e a plataforma de *IoT* são utilizados parceiros comerciais, permitindo à empresa fornecedora de gás o oferecimento da AMI sem a necessidade de implantação de infraestrutura privada para comunicação *LoRaWAN*, a qual não se justifica pelas características específicas da medição remota de clientes industriais.

O dispositivo eletrônico utilizou a comunicação *LPWAN* através do protocolo *LoRaWAN* para transmissão das variáveis de medição de gás natural. O uso do *LoRaWAN* juntamente com a rede neutra ATC forneceu flexibilidade de comunicação, permitindo a transmissão dos dados necessários de forma confiável, com baixo custo e de acordo com as necessidades do cliente. O *LoRaWAN* se mostrou uma solução vantajosa para a AMI em relação às outras *LPWAN*, além de proporcionar um custo de comunicação significativamente inferior às soluções existentes atualmente usando telefonia móvel 3G/4G.

A plataforma *ProIoT* foi utilizada para gerenciamento da comunicação e monitoramento de dados de medição de gás natural. Essa plataforma opera na nuvem, facilitando seu acesso e utilização, além de disponibilizar uma ferramenta para armazenar de dados e desenvolver scripts de análise de dados, a qual facilitou a implantação dessa funcionalidade na AMI.

No aspecto de melhoria na disponibilidade de dados, a AMI possibilitou o acesso mais frequente, contínuo e histórico aos dados de medição de gás. Como diferencial às soluções tradicionais de AMI, o foco foi no uso dessas informações para agregar valor ao processo de medição e faturamento de gás. Isso permitiu que análises fossem realizadas preventivamente e não corretivamente. Por exemplo, usando dados de vazão/volume,

a AMI pode analisar o perfil de consumo de um cliente, avaliar se o medidor está operando dentro dos limites recomendados e se o consumo de gás no período está de acordo com contratado.

VI. CONCLUSÃO

Esta pesquisa apresentou o desenvolvimento de uma AMI para gestão inteligente de gás natural de clientes industriais no Brasil. Os resultados desta pesquisa permitiram concluir que:

✓ A arquitetura desenvolvida para a AMI é simples e modular, podendo ser oferecida como um serviço, de forma flexível, escalável e customizada para cada cliente;

✓ A escolha do *LoRaWAN* como solução de comunicação para a AMI é adequada, cumprindo todos os requisitos de comunicação especificados para a solução;

✓ O uso de soluções comerciais para a conectividade *LoRaWAN* e plataforma de *IoT* permitem prover as funcionalidades necessárias para a AMI, sem a necessidade de implantação de infraestrutura de comunicação privada. Essa interface opera na nuvem, facilitando seu acesso e utilização;

✓ As funcionalidades de gestão inteligente implantadas, ainda que simples e em início de desenvolvimento, contribuem para o avanço do modelo de negócio atualmente existente de medição, faturamento e de prevenção dos ativos envolvidos no processo de custódia de gás natural em clientes industriais.

Trabalhos futuros objetivam desenvolver novas funcionalidades de gestão inteligente de gás natural, como predição de falhas de medidores e do consumo de gás do cliente.

REFERÊNCIAS

- [1] F. V. Schreiber et al., "Application of the IoT Paradigm for Supervision in the Utilities Industry," *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications*, pp. 864-869, 2018, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627211.
- [2] C. Nugroho and G. Wibisono, "NB-IoT Planning in Jakarta Area for Smart Meter Utilities," *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development*, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074629.
- [3] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, "LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations," *Future Internet*, vol. 12, no. 3, p. 46, 2020, doi: 10.3390/fi12030046.
- [4] J. Chan, R. Ip, K. W. Cheng and K. S. P. Chan, "Advanced Metering Infrastructure Deployment and Challenges," *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia*, pp. 435-439, 2019, doi: 10.1109/GTDAsia.2019.8715927.
- [5] Z. Wang et al., "Ultralow-Power Sensing Framework for Internet of Things: A Smart Gas Meter as a Case," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 7533-7544, 2022 doi: 10.1109/JIOT.2021.3110886.
- [6] V. Gomathy et al., "Internet of Things-Based Advanced Metering Infrastructure (AMI) for Smart Grids," *Integration of Renewable Energy Sources with Smart Grid*, pp. 77-100, 2021 doi: 10.1002/9781119751908.ch4.
- [7] LoRa Alliance, "Why Utilities are choosing Smart LoRaWAN® connectivity", https://loro-alliance.org/resource_hub/why-utilities-are-choosing-smart-lorawan-connectivity/ (Acesso em 23-11-2022).
- [8] A. Ikpehai et al., "Low-Power Wide Area Network Technologies for Internet-of-Things: A Comparative Review," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2225-2240, 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2883728.
- [9] J. L. Gallardo, M. A. Ahmed and N. Jara, "LoRa IoT-Based Architecture for Advanced Metering Infrastructure in Residential Smart Grid," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 124295-124312, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110873.

- [10] CPFL, Companhia Paulista de Força e Luz "CPFL Investor Day 2020" CPFL. <https://cpfl.rweb.com.br/Download.aspx?Arquivo=XtQj nCDzLSfKhn7+fdhb9Q=> (Acesso em 17-12-2022).
- [11] SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, Everynet apoia a implantação de medidores inteligentes de água pela SABESP e LAAGER no Brasil". <https://www.everynet.com/blog/everynet-apoia-implantacao-de-medidores-inteligentes-de-agua-pela-sabesp-e-laager-no-brasil> (Acesso em: 10-12-2022).
- [12] ABEGAS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado, "Comgás quer ter medição remota do consumo para 100% dos clientes". <https://www.abegas.org.br/arquivos/82714>. (Acesso em 24-12-2022).
- [13] ATC, American Tower, "Rede Neutra ATC LoRaWAN". ATC. <https://americantower.com.br/pt/solucoes/rede-neutra-lo-ran.html> (Acesso em: 12-12-2022)
- [14] Z. Ullah et al., "Applications of Artificial Intelligence and Machine learning in smart cities", *Computer Communications*, vol. 154, pp. 313-323, 2020, doi.org/10.1016/j.comcom.2020.02.069.
- [15] ABINC, Associação Brasileira de Internet das Coisas, "Panorama de IoT em Utilities no Brasil". ABINC, <https://abinc.org.br/noticias/abinc-realiza-webinar-sobre-iot-em-utilities> (Acesso em: 10-12-2022)
- [16] Conversores de volume de gás – Terminologia, classificação, faixas de medição e condições estipuladas de funcionamento, NBR 14978 Parte 1, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2020.
- [17] J. A. Micheletti and E. P. Godoy, "Improved Indoor 3D Localization using LoRa Wireless Communication," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 3, pp. 481-487, March 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9667147.
- [18] N. C. Almeida et al., "Proposal of a Hybrid LoRa Mesh / LoRaWAN Network," *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, 2020, pp. 702-707, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138206.
- [19] ProIoT, "Plataforma de IoT com conectividade LoRaWAN". ProIoT. <https://proiot.com.br/aplicacao> (Acesso em 22-06-2022).
- [20] P. J. Basford et al., "LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long Term Evaluation," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 648, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20030648.



Everton Camoleze de Araujo received the B.Eng. degree in Electrical Engineering and specialization in Control and Automation Engineering from the Engineering College of Sorocaba (Facens) (SP-Brazil) in 2017 and 2019. M.Sc. in Electrical Engineering at São Paulo State University (Unesp) (SP-Brazil). His research interests include automation and Internet of Things (IoT). <http://lattes.cnpq.br/2993864687626510>.



Nelson Camilo de Almeida received the B.Tech. degree in Automotive Electronic from Fatec Technology College in 2012, specialization in Industrial Automation in 2018 and M.Sc. in Electrical Engineering in 2022 from Unesp at Sorocaba (SP-Brazil). His research interests include embedded systems and LoRaWAN communication. <http://lattes.cnpq.br/6678158935206985>.



Eduardo Paciencia Godoy received the B.Eng. degree in Control and Automation Engineering at Itajubá Federal University (MG-Brazil) in 2003 and the M.Sc. and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering at University of São Paulo (SP-Brazil) in 2007 and 2011. Currently he is an Associate Professor of Unesp (SP-Brazil) with research interests in IoT and Industry 4.0. <http://lattes.cnpq.br/0072632067545698>.