

Metodologia para Teste e Classificação de Medidores Inteligentes para Aplicações de Redes Elétricas Inteligentes

Renan Corrêa de Moura*, Luiz H. L. Rosa*, Carlos F. M. Almeida*, Nelson Kagan*, Alexandre Dominice**

*Departamento de Engenharia de Energia e Automação da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; São Paulo, Brasil (e-mail: r.moura@usp.br, luizhenrique.rosa@usp.br, cfmalmeida@usp.br, nelsonk@pea.usp.br)

**Grupo EDP; São Paulo, Brasil (e-mail: alexandre.dominice@edpbr.com.br)

Abstract: Smart Meters play a key role in the performance of Smart Grids, exhibiting essential features not only for display and billing, but also for power quality monitoring, fraud detection system, recorded data security, distribution automation, among other functions. This paper presents a methodology for Smart Meters testing e classification according its functionalities, aiming to assist power utilities at smart meter evaluation and comparison process regarding the technical/functional requirements for *Smart Grids* implementation. In this analysis, features related to power supply quality, fraud detection system, operational safety alarms and smart meter configuration are evaluated through tests performed at the NAPREI/USP Smart Grid Laboratory. In addition, this paper presents the infrastructure and the integration of the metering system with the main applications of Smart Grids that aim to increase the power utility efficiency.

Resumo: Os medidores inteligentes de energia elétrica cumprem papel fundamental para o desempenho das Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*, apresentando funcionalidades essenciais não somente para a área de medição e faturamento, mas também para o monitoramento da qualidade da energia elétrica, sistema de prevenção de fraude, segurança dos dados registrados, automação da distribuição, entre outras funções. Este trabalho apresenta uma proposta de metodologia para testes e classificação de medidores inteligentes segundo suas funcionalidades, objetivando auxiliar as concessionárias no processo de avaliação e comparação dos medidores inteligentes quanto aos requisitos técnico/funcionais para implementação das *Smart Grids*. Nessa análise são avaliadas as funcionalidades referentes à qualidade do fornecimento da energia elétrica, sistema de detecção de fraude, alarmes de segurança de operação e configuração do medidor inteligente através de testes realizados no Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes do NAPREI/USP. Além disso, apresenta-se a infraestrutura e a integração do sistema de medição com as principais aplicações das *Smart Grids* que visam aumentar a eficiência da concessionária de energia elétrica.

Keywords: *Smart Meter; Power Quality; Fraud Detection; Smart Grid; AMI.*

Palavras-chaves: Medidores Inteligentes; Qualidade de energia; Detecção de fraudes; *Smart Grid; AMI.*

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*), o termo *Smart Grid* como é uma definição de rede elétrica que utiliza recursos de comunicação, controle, integração de fontes de energia, modelos de geração e adaptação dinâmica aos requisitos dos agentes reguladores do setor de energia. Já para a Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission, IEC*), o termo *Smart Grid* baseia-se no desenvolvimento de equipamentos, controles e novas tecnologias que atuam conjuntamente para resposta imediata da demanda de energia elétrica do século XXI (DILEEP, 2020).

O funcionamento de uma *Smart Grid* consiste no fluxo bidirecional de energia e comunicação que ocorre entre geração, transmissão, distribuição e cliente (BHATT, SHAH e

JANI, 2014). A Tabela 1 apresenta a comparação entre uma rede inteligente e uma rede convencional.

Tabela 1. Comparação entre *Smart Grid* e rede convencional

Rede Convencional	<i>Smart Grid</i>
Eletromecânica	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Muitos sensores
Monitoramento manual	Auto monitoramento
Restauração manual	Auto correção
Falhas e apagões	Adaptativos e ilhados
Controle limitado	Controle adaptativos
Poucas opções para os clientes	Muitas opções para os clientes

As principais aplicações que envolvem uma *Smart Grid* estão apresentadas na Fig. 1 (ESCOBEDO, JACOME e ARROYO-FIGUEROA, 2016).

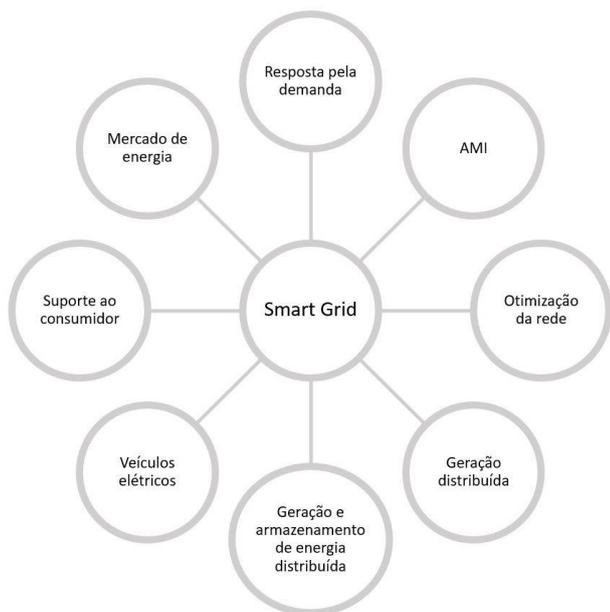


Fig. 1 Aplicações da *Smart Grid*.

Onde cada aplicação pode ser descrita como:

- Infraestrutura avançada de medição (*Advanced Metering Infrastructure, AMI*): Leitura remota dos medidores, conexão/desconexão remota, detecção de furto, pré-pagamento da fatura, gerenciamento da força de trabalho móvel;
- Resposta pela demanda: manutenção avançada da demanda nos horários de pico, previsão e mudança de carga;
- Otimização da rede: Gerenciamento de falta de energia, controle de chaves, controle dinâmico da tensão, integração com dados meteorológicos e controle de banco de capacitores;
- Geração e armazenamento de energia distribuída: monitoramento dos ativos distribuídos;
- Veículos elétricos: identificação de instalação de ponto de carregamento;
- Suporte ao consumidor: Aplicação do fluxo de dado para gerenciamento de energia elétrica do usuário final;
- Mercado de energia: tarifa dinâmica.

Nas redes elétricas inteligentes, uma das aplicações mais importantes é a infraestrutura de medição avançada *AMI*, utilizada para medir, coletar e analisar dados de consumo de energia e qualidade, tanto de produto como de serviço, de cada consumidor. A comunicação utilizada na aplicação *AMI* é bidirecional, permitindo à concessionária a realização de melhoria na operação, aumento da eficiência da manutenção da rede elétrica, gerenciamento da demanda e aumento na capacidade de planejamento de expansão da rede elétrica (KABALCI, 2016). Uma estrutura típica de *AMI* é apresentada na Fig. 2:

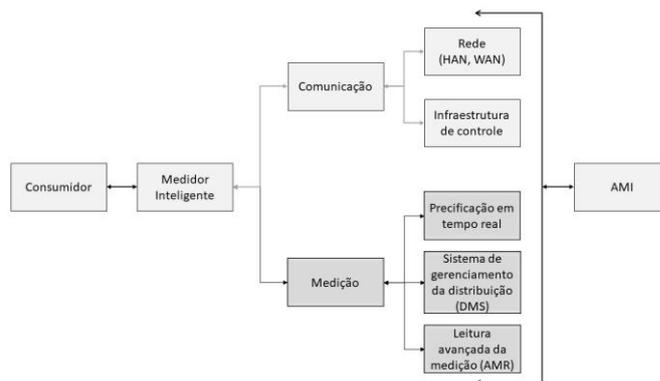


Fig. 2 Estrutura da solução *AMI*.

Os medidores inteligentes são a base da *AMI*. Sendo assim, eles são extremamente importantes para o conceito de *Smart Grid*, uma vez que são responsáveis pela medição do consumo de energia elétrica das residências e indústrias. Dessa maneira, as concessionárias de energia conseguem maiores informações sobre o perfil de consumo de seus clientes, podendo utilizar esses dados para fornecer novos serviços aos consumidores (ZHENG, GAO e LIN, 2013). Além disso, os medidores inteligentes fornecem dados de qualidade da rede elétrica para que algoritmos de otimização calculem com maior eficiência e precisão situações de inconformidade na rede elétrica. As principais funcionalidades da *Smart Grid* que utilizam dados dos medidores inteligentes dependem da infraestrutura *AMI* conforme apresentada na Fig. 3:

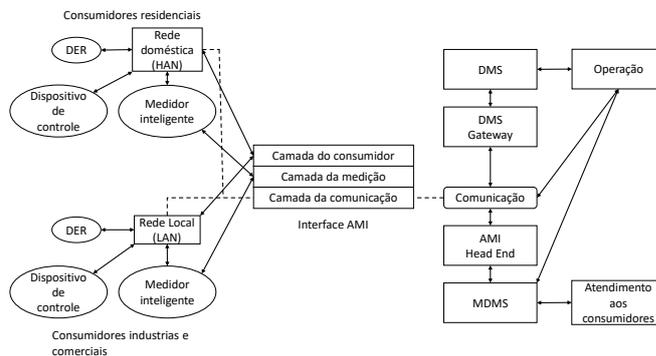


Fig. 3 Compartilhamento dos dados da solução *AMI* com outros sistemas.

Em que:

- *Sistema de Gerenciamento da Distribuição (Distribution Management System, DMS)*: sistema de gerenciamento da rede elétrica que consiste na manutenção da rede dentro dos parâmetros exigidos. A utilização desse sistema permite o aumento da confiabilidade de estabilidade da rede elétrica;
- Recursos Energéticos Distribuídos (*Distributed Energy Resource, DER*): realiza o gerenciamento das fontes de geração distribuída atuando para estabilização da rede elétrica;
- Sistema de Gerenciamento de Dados do Medidor (*Meter Data Management System, MDMS*): realiza o gerenciamento dos dados de longo prazo coletados pela

aplicação *AMI* como tratamento e validação dos dados para fechamento de fatura.

O *DMS* utiliza dados relacionados às grandezas elétricas, como tensão e corrente, para a realização dos cálculos de otimização da rede elétrica, por exemplo, localização de falta e controle do nível de tensão e de fator de potência. O *DER* solicita aos medidores inteligentes os dados relacionados a potência consumida e gerada, visando controle da demanda através dos dispositivos de controle instalados no consumidor. Por fim, o *MDMS* solicita ao medidor inteligente os dados de energia consumida e gerada para fechamento da fatura do cliente e avaliação do perfil do consumo de cada cliente.

Para que o medidor possa ser considerado “inteligente” é necessário que ele atenda, ao menos, aos seguintes requisitos:

1. Comunicação bidirecional;
2. Função de coleta de dados;
3. Registro dos dados;
4. Armazenamento dos dados registrados;
5. Controle de carga;
6. Programação do medidor;
7. Segurança;
8. Configuração do display;
9. Configuração do faturamento.

Contudo, a concessionária deve verificar as funcionalidades que os medidores inteligentes possuem e se estão convergentes com as aplicações de controle estabelecidas na sua *Smart Grid* (BARAI, KRISHNAN e VENKATESH, 2015). As principais funcionalidades dos medidores inteligentes solicitadas pelas concessionárias são:

- Leitura remota;
- Dados do perfil de carga;
- Acesso a dados medidos sob demanda;
- Opção de tarifas variáveis;
- Gerenciamento remoto dos medidores;
- Conexão de desconexão remota;
- Qualidade do fornecimento;
- Detecção de violação do medidor e roubo de energia elétrica;
- Detecção de falta de energia;
- Detecção do uso de energia sob demanda.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pelo estabelecimento dos requisitos técnicos para conexão dos medidores a rede elétrica e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é o órgão

responsável por estabelecer os limites de erros metrológicos das grandezas elétricas registradas pelos medidores (CARVALHO, 2015). Contudo, nenhum dos órgãos trata especificamente de medidores inteligentes, ou seja, não regula as funcionalidades dos medidores inteligentes, deixando livre para que cada fabricante desenvolva as funcionalidades que serão aplicadas a seus medidores.

Visando auxiliar as concessionárias de energia elétrica na avaliação da escolha do medidor inteligente que melhor atenda seus objetivos na implementação do conceito de *Smart Grid* em sua estrutura, o Laboratório de Rede Inteligentes – NAPREI/USP – desenvolveu um emulador de carga e gerador de eventos de distúrbios para que os medidores inteligentes fossem testados. Nesses testes são avaliadas a aplicação e os limites de atuação de cada funcionalidade do medidor inteligente. Dessa maneira, são analisadas possíveis falhas que possam acontecer no momento da implantação desses medidores nas concessionárias de energia.

Este artigo apresenta a taxonomia das funcionalidades dos medidores inteligentes dos fabricantes que possuem seus medidores homologados no INMETRO até 2019, pois uma vez homologados podem ser instalados e estão de acordo com o padrão metrológico da instituição. Logo, o Laboratório de rede inteligente não visa realizar os testes metrológicos, e sim, as funcionalidades dos medidores

2. METODOLOGIA

As seções a seguir apresentam os aspectos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Laboratório de Redes Inteligentes – NAPREI/USP

O laboratório de redes inteligentes – NAPREI/USP – possui uma infraestrutura para a realização dos testes relacionados às funcionalidades da solução *AMI*. Chamada de ilha de medição, a infraestrutura contempla um conjunto de 40 emuladores de carga/geração dispostos em painéis conforme apresentado na Fig. 4. Os emuladores feitos foram projetados para sensibilizarem os medidores inteligentes com valores de tensão entre 25 V e 250 V e valores de corrente entre 0,01 A e 15 A. Os emuladores de carga possuem três canais de tensão e três canais de corrente todos independentes e podem gerar sinais com ângulos de fase entre 0° e 360° a partir do sinal de sincronismo com sinal de sua alimentação, desta forma, esses emuladores podem simular qualquer situação de consumo ou geração de um consumidor de energia ou de um evento na rede elétrica de distribuição. Dessa maneira, o emulador de carga é capaz de impor aos medidores condições controláveis de consumo ou geração de energia a partir do controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada uma das tensões e correntes que percorrerão o circuito de medição do equipamento.

É importante destacar que os emuladores podem ser configurados manualmente, necessitando configuração local, ou de maneira automática, sendo realizada a imputação da configuração dos sinais por meio de uma rede de comunicação *Modbus*.



Fig. 4 Imagem dos painéis da ilha de medição.

A capacidade de testes simultâneos depende do tipo dos medidores inteligentes. A Tabela 2 especifica a quantidade de medidores inteligentes que podem ser testados simultaneamente. Ressalta-se que devido aos canais de tensão e corrente serem independentes, pode-se realizar a ligação de mais de um tipo de medidor por emulador, por exemplo, testando simultaneamente um medidor inteligente monofásico e um bifásico.

Tabela 2. Capacidade de testes dos medidores inteligentes

Descrição	Quantidade
Monofásico	120
Bifásico	60
Trifásico	40

Cada medidor é alimentado por um emulador de carga capaz de impor aos medidores condições controláveis de consumo ou geração de energia a partir do controle individual das amplitudes e ângulos de fase de cada uma das tensões e correntes que percorrerão o circuito de medição do equipamento.

A ilha de medição está integrada à infraestrutura de medição do laboratório constituída por um sistema de comunicação que utiliza protocolo (Device Language Message Specification and Companion Specification for Energy Metering, *DLMS/COSEM*) para integração com o sistema de coleta dos dados e gerenciamento das medições (*MDC/MDM*). Dessa forma, os medidores inteligentes enviam, através da infraestrutura de comunicação, os registros de medição emulados para o *MDC/MDM*, que disponibiliza as medições para os demais sistemas utilizados nos testes.

2.2 Taxonomia para Funcionalidades de Medidores Inteligentes

As principais funcionalidades avaliadas nesse artigo estão divididas em três blocos, sendo que cada bloco foi dividido de acordo com as funcionalidades afins, conforme apresentado a seguir:

- Bloco 1: avaliação das funcionalidades que envolve a qualidade do fornecimento da energia elétrica;

- Bloco 2: avaliação das funcionalidades referentes aos alarmes de segurança de operação e configuração do medidor inteligente.
- Bloco 3: avaliação das funcionalidades referentes aos alarmes utilizados para detecção de tentativas de fraudes nos medidores inteligentes.

A Tabela 3 apresenta o detalhamento das funcionalidades por bloco.

Tabela 3. Funcionalidades dos medidores inteligentes divididas por blocos

Item	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
1	Desequilíbrio de corrente	Abertura do relé	Abertura da caixa de medição
2	DRP por fase	Fechamento do relé	Corrente de neutro
3	DRC por fase	Abertura local do relé	Corrente de neutro medida diferente da calculada
4	Máximo DRP	Fechamento local do relé	Corrente reversa
5	Máximo DRC	Alteração de parâmetros	Deteção da abertura da tampa do bloco de terminais
6	Limite baixo de DRP	Falha de criptografia ou autenticação	Deteção da abertura da tampa do NIC
7	Limite máximo de DRP	Ajuste do relógio	Deteção da abertura da tampa principal
8	Limite baixo de DRC	Indicador de troca de bateria	Deteção da remoção do NIC
9	Limite máximo de DRC	Estado da bateria	Deteção de fechamento da tampa do bloco de terminais
10	Máximo DRP no último mês	Ativação de múltiplas tarifas	Deteção de fechamento da tampa principal
11	Máximo DRC no último mês	Alteração de múltiplas tarifas	Deteção de início do campo magnético
12	Ângulo entre as tensões	Erro de Ram	Deteção de movimento
13	Ângulo entre tensão e corrente por fase	Erro na memória não volátil	Deteção do término do campo magnético
14	Fator de potência por fase	Erro na memória flash	Duração do campo magnético
15	Fator de potência baixo	Erro de watchdog	Erro de autenticação de usuário
16	Identificação do fator de potência	Erro no sistema de medição	Falha de autenticação

17	Fator de potência total	Firmware válido para ativação	Falha de comunicação
18	Frequência total	Firmware ativado	Falha no relé (abertura do relé)
19	Frequência por fase	Indicação de que o medidor foi zerado	Fechamento da caixa de medição
20	Sweel	Configuração do perfil de carga	Presença de corrente sem tensão
21	Sag	Falta da fase A	Reset do Medidor
22	Amplitude do evento de VTCD	Falta da fase B	Tempo de abertura da tampa do bloco de terminais
23	Duração do evento de VTCD	Falta da fase C	Tempo de abertura da tampa principal
24	Frequência de ocorrência de eventos de VTCD	Início e fim da falta de fase	Tensão pós-abertura do relé
25	DIC	Fluxo de potência reverso	-----
26	FIC	Last gasp	-----
27	DMIC	Retorno da falta de energia	-----
28	Distorção harmônica individual de tensão da ordem h (DITH)	Temperatura alta	-----
29	Distorção harmônica total de tensão (DTT)	Horário de verão	-----
30	Sequência de fase invertida	Status do módulo de comunicação	-----
31	Sobrecorrente	Falha no NIC	-----
32	Subcorrente	Falha no relógio	-----
33	Tensão máxima	Alteração do relógio	-----
34	Tensão mínima	Reset de parâmetros	-----
35	Subtensão	Limpeza de evento	-----
36	Sobretensão	Falta de corrente	-----
37	Subtensão entre fases	-----	-----
38	Sobretensão entre fases	-----	-----
39	Corrente de neutro	-----	-----
40	Falta de longa duração	-----	-----

3. RESULTADO DOS TESTES EM LABORATÓRIO

A taxonomia proposta foi aplicada para as funcionalidades de modelos de medidores inteligentes de cinco fabricantes distintos, sendo que todos os fabricantes possuem seus

equipamentos homologados no INMETRO. Visando resguardar os fornecedores dos medidores, esses serão tratados como fabricantes A, B, C, D, e E.

A Tabela 4 apresenta o resultado da comparação por bloco, verificando-se que os fabricantes A, B e E estão direcionando seus produtos para o atendimento do bloco 2, que atende a segurança de operação do equipamento. Em contrapartida, o fabricante D é o que menos atende o bloco 2.

Quando analisado o bloco 1 – qualidade da energia elétrica – os fabricantes B, D e E consideram esse segmento como uma função secundária. Já o fabricante F considera esse item como prioritário no desenvolvimento do seu produto, apesar de apresentar um nível relativamente menor quando comparado aos outros fabricantes.

Em relação ao bloco 3 – detecção de fraudes – os fabricantes C e D consideram que esse bloco é prioridade no desenvolvimento de seus medidores inteligentes. Os fabricantes B, E e F avaliam esse bloco como uma função terciária. Ressalta-se que apesar dessa consideração, os fabricantes B e E atendem, no mínimo, 50% das funcionalidades especificadas nos blocos.

Tabela 4. Resultado dos fabricantes por bloco

Descrição	A	B	C	D	E	F
Bloco 1	46%	63%	37%	49%	59%	34%
Bloco 2	83%	78%	33%	28%	67%	31%
Bloco 3	63%	54%	42%	54%	50%	21%

A Fig. 5 apresenta o gráfico do nível de atendimento de cada fornecedor. Além disso, é apresentado o nível de atendimento médio dos três blocos de avaliação.

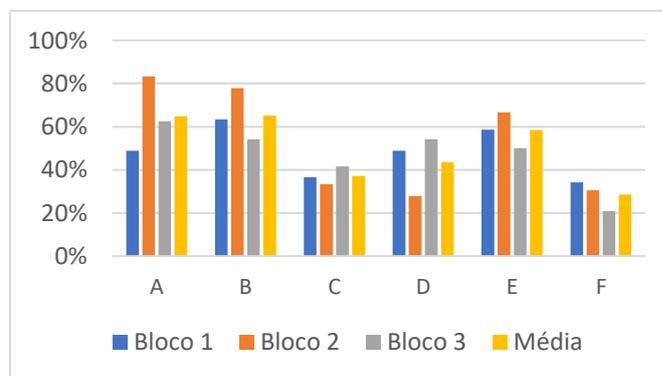


Fig. 5 Gráfico de atendimento aos blocos de avaliação.

4. CONCLUSÕES

Os medidores inteligentes nas redes *Smart Grid* são essenciais não somente para a área de medição e faturamento, mas também para a operação da rede elétrica, pois viabilizam o amplo monitoramento da rede, permitindo melhorias no projeto de expansão de rede, melhorias nas técnicas de localização de defeitos, mitigação de perdas comerciais e melhoria na qualidade do produto e do serviço.

Algumas concessionárias de rede elétrica reúnem milhões de consumidores devido a extensão da área de concessão. Dessa

forma, demonstra-se necessário, em razão da extensão da área de concessão e eventuais peculiaridades de determinados trechos, que as concessionárias avaliem os equipamentos conforme o foco de atuação, por exemplo, perdas técnicas, qualidade de energia e prevenção e combate as perdas elétricas.

Visando auxiliar as concessionárias de energia na escolha dos modelos de medidores inteligentes esse artigo apresentou uma proposta de metodologia para teste e avaliação de medidores inteligentes e suas funcionalidades de cinco fabricantes de medidores inteligentes a partir de testes em laboratório visando avaliar aplicações para *Smart Grids*. Nessa avaliação foi observado que cada fabricante direciona seus produtos para atender determinados blocos funcionais definidos nesta metodologia, sendo que o bloco 2 (segurança de operação do equipamento) é considerado pela maioria dos fabricantes como item prioritário, seguido do bloco 1 (qualidade da energia) e do bloco 3 (detecção de fraudes).

O ambiente do Laboratório de *Smart Grids* do NAPREI/USP mostrou-se adequado para os testes das funcionalidades de medidores inteligentes escolhidas para a taxonomia proposta, com destaque para o emulador de cargas, que permitiu a conclusão dos testes com sucesso.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que cada concessionária deverá avaliar qual o perfil de medidor mais adequado para as necessidades em sua área de concessão, comparando as funcionalidades dos medidores com os requisitos técnico/funcionais de sua infraestrutura *AMI*. Isto se deve à grande diferença entre os medidores avaliados, uma vez que cada fabricante está desenvolvendo seus produtos com foco em determinados blocos. Logo, um medidor com prioridade no atendimento a qualidade da energia elétrica pode não atender as demandas ao atendimento a prevenção de fraude, por exemplo.

Por fim, a proposta de metodologia para testes e avaliação de medidores inteligentes com foco nas aplicações de *Smart Grids* apresentada neste trabalho mostrou-se aderente para a descrição e classificação das funcionalidades e pode ser utilizada para comparação dos medidores inteligentes disponíveis no mercado brasileiro.

REFERÊNCIAS

- BARAI, Gouri R.; KRISHNAN, Sridhar; VENKATESH, Bala. Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review. In: 2015 *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 2015. p. 138-145
- BHATT, Jignesh; SHAH, Vipul; JANI, Omkar. An instrumentation engineer's review on smart grid: Critical applications and parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 1217-1239, 2014.
- CARVALHO, Priscila. Smart metering deployment in Brazil. *Energy Procedia*, v. 83, p. 360-369, 2015.
- CECATI, Carlo et al. An overview on the smart grid concept. In: *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2010. p. 3322-3327.
- DILEEP, G. A survey on smart grid technologies and applications. *Renew. Energy*, v. 146, p. 2589-2625, 2020.
- ESCOBEDO, G.; JACOME, Norma; ARROYO-FIGUEROA, Gustavo. Business Intelligence and Data Analytics (BI&DA) to Support the Operation of Smart Grid-Business Intelligence and Data Analytics (BI&DA) for Smart Grid. In: *Special Session on Recent Advancement in IoT, Big Data and Security*. SCITEPRESS, 2016. p. 489-496.
- KABALCI, Yasin. A survey on smart metering and smart grid communication. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 57, p. 302-318, 2016.
- ROADMAP, IEC Smart Grid Standardization. SMB Smart Grid Strategic Group SG3. 2010.
- ZHENG, Jixuan; GAO, David Wenzhong; LIN, Li. Smart meters in smart grid: An overview. In: *2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. IEEE, 2013. p. 57-64.