

Desenvolvimento e Implementação de um Medidor Inteligente com uma Interface para Visualização de Parâmetros de Qualidade de Energia

João Vitor da Silva, Jean Patric da Costa, Emerson Giovani Carati, Rafael Cardoso, Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Pato Branco

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

joaovitorasilva@gmail.com, jpcosta@utfpr.edu.br, emerson@utfpr.edu.br, rcardoso@utfpr.edu.br, cmstein@utfpr.edu.br

Resumo — Neste trabalho é apresentado um medidor inteligente monofásico, o qual atende os métodos de medição classe S especificados no PRODIST e na norma IEC 61000-4-30. Foi desenvolvido, para o medidor proposto, uma interface que permite o monitoramento de parâmetros elétricos e de qualidade de energia, a qual permite a interação do usuário para a obtenção de informações detalhadas sobre o estado da rede. São apresentados resultados experimentais, a partir de um *setup* de escala reduzida, para ilustrar o funcionamento da interface e validar o funcionamento do medidor inteligente desenvolvido.

Palavras-chaves — Medidor Inteligente, Interface, Monitoramento, Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

O medidor inteligente pode ser visto como um medidor com diversas funcionalidades, o qual apresenta como principais características: informações de indicadores de qualidade de energia, como por exemplo distorções harmônicas e variações momentâneas de tensão, e também informações sobre o consumo e geração de energia da unidade consumidora. Além disso, os medidores permitem o compartilhamento de informações com a concessionária através de um canal de comunicação. Devido as suas características, um medidor inteligente pode ser considerado como um dispositivo essencial para o monitoramento e para o gerenciamento da rede elétrica [1]-[3].

O aumento da demanda de energia elétrica, do número de conexões de novas cargas e da inserção da geração distribuída é contínuo. Os distúrbios de qualidade de energia estão cada vez mais presentes, os quais podem degradar as características de tensão e de corrente da rede, resultando em um mau funcionamento no fornecimento de energia elétrica. Dentre os principais distúrbios, pode-se citar as distorções harmônicas e as variações de tensão de curta duração, as quais envolvem interrupções, afundamentos e elevações de tensão [4]-[5].

As informações disponibilizadas através de um medidor inteligente podem contribuir com a melhoria da qualidade de fornecimento de energia elétrica, podendo resultar em uma maior eficiência energética, beneficiando tanto o consumidor como a concessionária. O consumidor pode ter o conhecimento do estado da rede e das quantidades de energia consumida e produzida. Logo, o seu comportamento pode ser influenciado perante períodos críticos de utilização, tais como

períodos com demanda e tarifas elevadas ou então com baixa disponibilidade de energia elétrica [6].

Em [1] é proposto um medidor inteligente capaz de fornecer informações relacionadas à fatura e parâmetros elétricos para a concessionária, em tempo quase real, através de uma rede de comunicação de dados. Em [7] é proposto um medidor inteligente que utiliza a teoria de potência conservativa, onde os autores acreditam que as informações apresentadas por ele possam auxiliar no gerenciamento de energia e na compensação de distúrbios. Em [8] é apresentado que os medidores inteligentes geralmente apresentam o funcionamento voltado para a utilização da concessionária, sendo que a utilização do lado do usuário é pouco explorada. Muitos dos trabalhos existentes apresentam as características e o funcionamento de um medidor inteligente, porém o modo de como é apresentada as informações para o consumidor é pouco discutida.

Embora nem todos os consumidores compreendam os parâmetros elétricos e de qualidade de energia, para que ocorra uma interação entre o consumidor e a rede elétrica, faz-se necessário a utilização de interfaces que possibilitem o monitoramento e apresentem, de maneira intuitiva e simplificada, as principais características do estado da rede. Neste contexto, este trabalho apresenta uma interface, desenvolvida para o medidor inteligente proposto, para a visualização dos parâmetros elétricos e de qualidade de energia. Através desta interface, serão apresentadas informações relacionadas com: o consumo, os valores eficazes de tensão e corrente, a frequência, as potências aparente, ativa e reativa, o fator de potência, as harmônicas de tensão e corrente, as variações de tensão de curta duração e alguns indicadores de qualidade de energia. Serão apresentados resultados experimentais obtidos através de um *setup* de escala reduzida, o qual tem como objetivo emular um consumidor conectado à rede ou à uma geração distribuída, sujeito a variações momentâneas de tensão.

II. MEDIDOR INTELIGENTE

Um medidor inteligente é um dispositivo com capacidade elevada de processamento de sinais. Sua arquitetura é similar ao de um sistema de aquisição de dados composta por: condicionamento de sinal, aquisição de sinal, tratamento de

dados e comunicação com o meio externo [1]. A etapa de tratamento de dados, que será detalhada na subseção seguinte, é responsável por analisar e gerar as informações de interesse para o consumidor e para a concessionária.

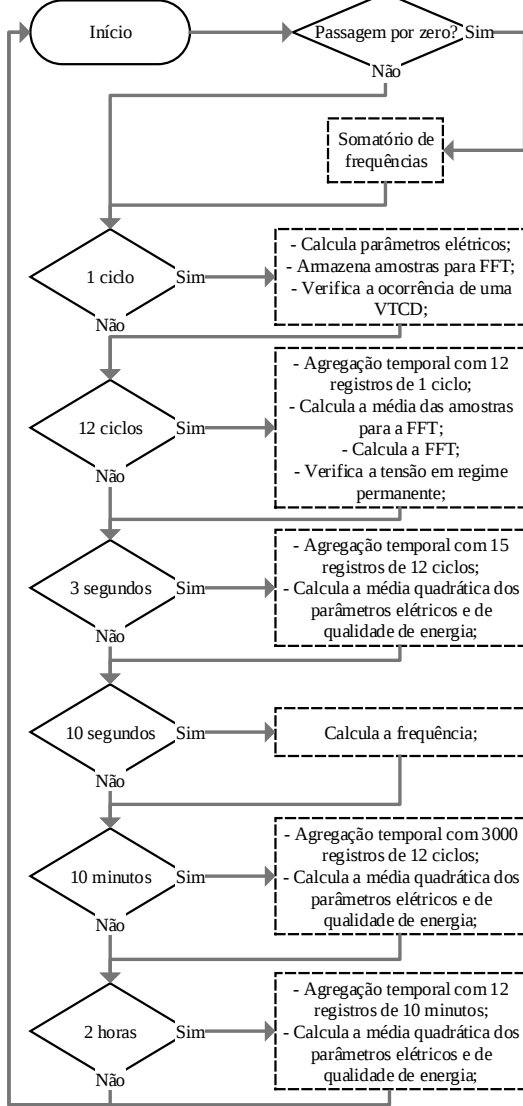


Fig. 1. Fluxograma de funcionamento do medidor proposto.

De acordo com o PRODIST [12], os instrumentos de medição devem atender os métodos de medição classe A ou S especificados na norma IEC 61000-4-30. Para a etapa de tratamento de dados, os intervalos de medição dos parâmetros elétricos foram selecionados conforme especificado em [13]. Na Fig. 1, é possível visualizar o fluxograma do funcionamento do medidor proposto. Utilizou-se um ciclo para a verificação da ocorrência de variações de tensão de curta duração. Para um sistema com frequência nominal de 60Hz, considerou-se um intervalo básico de medição de doze ciclos para o cálculo de parâmetros elétricos (valores eficazes de tensão e corrente, e potências) e de qualidade de energia (componentes harmônicas), e a partir do intervalo básico foram realizadas agregações temporais de três segundos e de dez minutos. A partir dos intervalos de dez minutos realizou-se uma nova agregação temporal de duas horas. Para o cálculo da frequência considerou-se um intervalo de dez segundos.

Para a implementação do medidor inteligente monofásico, utilizou-se o *Discovery STM32F7*, na Fig. 2 está apresentado o diagrama do medidor, onde os sinais analógicos de tensão e corrente foram condicionados, respectivamente, através de um circuito subtrator de tensão e de um sensor de corrente por efeito Hall ACS712, seguido de filtros *anti-aliasing* com frequência de corte de 3,84kHz. Após condicionados, os sinais foram enviados ao STM32F7 e convertidos para seus respectivos valores digitais através de um conversor analógico/digital com resolução de 12 bits. A frequência de amostragem utilizada foi de 7680Hz, a qual resulta em 128 amostras por ciclo.

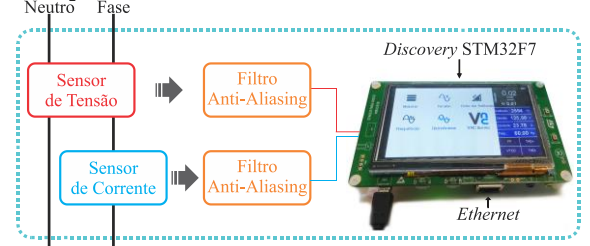


Fig. 2. Diagrama do medidor inteligente proposto.

A. Tratamento de Dados

Esta etapa envolve a manipulação dos dados obtidos, de onde são extraídas as informações pertinentes ao consumo e geração de energia e demais grandezas elétricas. Os valores eficazes de tensão e corrente foram calculados, respectivamente, através de:

$$V_{RMS} = G_V \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N V[n]^2}{N}} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = G_I \cdot \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N I[n]^2}{N}} \quad (2)$$

onde: $V[n]$ e $I[n]$ são os sinais amostrados no instante n , N é o número total de amostras em um ciclo, G_V e G_I são os respectivos ganhos de instrumentação de tensão e corrente.

As potências aparente, ativa e reativa foram obtidas respectivamente através de:

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (3)$$

$$P = G_V \cdot G_I \cdot \frac{\sum_{n=1}^N V[n] \cdot I[n]}{N} \quad (4)$$

$$Q = G_V \cdot G_I \cdot \frac{\sum_{n=1}^N V_{90}[n] \cdot I[n]}{N} \quad (5)$$

onde: $V_{90}[n]$ é o sinal de tensão amostrado no instante n defasado em 90 graus. A potência reativa pode ser calculada também através das componentes fundamentais de tensão e corrente e da defasagem angular entre estas grandezas, atendendo as especificações da norma IEEE 1459-2010 para sinais não senoidais.

O fator de potência é obtido através da relação:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (6)$$

A energia ativa é calculada através da potência ativa:

$$E_A = P \cdot N \cdot T_S \quad (7)$$

onde T_S é o período de amostragem.

O cálculo da frequência é realizado, após a utilização de um filtro digital para prevenir possíveis passagens por zero decorrentes da presença de componentes harmônicas, através de uma interpolação entre as amostras em que ocorre a mudança de sinal de positivo para negativo ou vice-versa. Através do tempo da penúltima e da última passagem por zero, calcula-se e armazena-se a frequência resultante. Ao alcançar o intervalo de medição, a frequência é obtida entre a relação do somatório de frequências e o número de cruzamentos por zero naquele mesmo intervalo:

$$f = \frac{\sum f}{\text{ContCruzamento}} \quad (8)$$

As componentes harmônicas de tensão e corrente foram calculadas através da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT). A sua utilização se dá ao fato do aproveitamento de cálculos anteriores que resultam na redução de operações e consequentemente apresentam uma resposta mais rápida [9]. A partir das componentes harmônicas pode-se calcular a distorção harmônica total de tensão ($DTT_p\%$), a distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de três ($DTT_p\%$), a distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de três ($DTT_i\%$) e a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de três ($DTT_3\%$), conforme especificado no PRODIST [12].

Através do monitoramento dos valores eficazes de tensão de um ciclo, é possível classificar as variações de tensão de curta duração (VTCDs) conforme especificado no PRODIST [12]. Primeiramente, compara-se a amplitude da tensão medida, se identificada alguma variação, armazena-se o tempo de ocorrência da mesma e, ao fim desta ocorrência, a VTCD é classificada de acordo com a sua amplitude e duração.

III. INTERFACE DESENVOLVIDA

A interface proposta implementada no *Discovery STM32F7* apresenta como principais características: uma tela LCD *touchscreen* de 4,3", e uma porta de comunicação *ethernet*. Esta porta foi utilizada para a obtenção dos resultados do medidor proposto, onde o mesmo foi conectado à uma rede padrão *ethernet*. Como o foco deste trabalho é apresentar a interface voltada para a utilização do consumidor, a comunicação com a concessionária não será realizada, embora a mesma possa ser implementada também através da porta de comunicação *ethernet*. De modo geral, a interface apresenta indicadores visuais que informam se determinados parâmetros estão de acordo com os limites definidos no PRODIST [12], sendo estes relacionados com a tensão em regime permanente, as variações de tensão de curta duração, o fator de potência, as harmônicas e a variação de frequência. Na tela principal e nos módulos, caso algum dos parâmetros não esteja de acordo com as normas regulamentadoras, os indicadores visuais alteram-se de cor, facilitando o entendimento da ocorrência de alguma

anormalidade. Na interface proposta, apresentada na Fig. 3, é possível visualizar uma síntese de informações e diferentes módulos que compõem o medidor:

- **Resumo:** contém informações relacionadas ao consumo, parâmetros elétricos e de qualidade de energia, conforme apresentado na Fig. 4.
- **Tensão:** contém informações relacionadas à tensão em regime permanente, e também à VTCDs, onde é exibido a classificação, a duração e um histórico de ocorrências.
- **Fator de Potência:** contém informações sobre as potências aparente, ativa e reativa, e também um histórico dos valores de fator de potência.
- **Frequência:** contém informações e um histórico relacionado à frequência.
- **Harmônicas:** contém informações relacionadas às distorções harmônicas de tensão e corrente, e também de algumas harmônicas individuais, conforme apresentado na Fig. 5.
- **VNC Server:** permite o acesso ao medidor através da porta de comunicação *ethernet*, a qual foi utilizada para a obtenção das informações resultantes do funcionamento do medidor proposto.



Fig. 3. Tela principal da interface proposta.

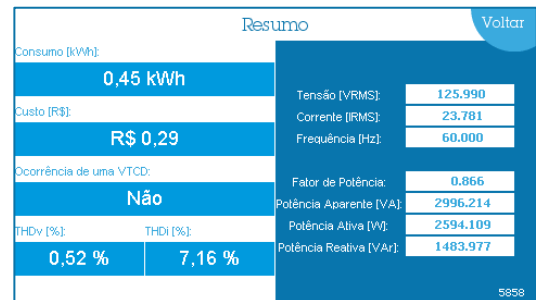


Fig. 4. Tela do módulo de resumo da interface proposta.

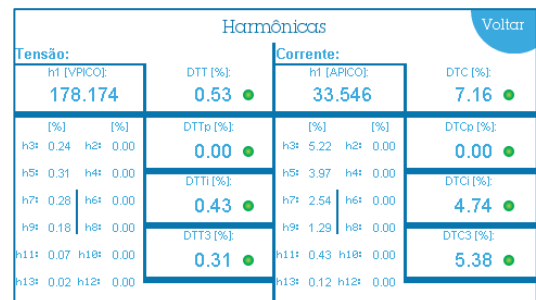


Fig. 5. Tela do módulo de harmônicas da interface proposta.

IV. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a verificação experimental do medidor e da interface desenvolvida, uma plataforma de emulação de um consumidor foi utilizada. De maneira resumida, o *setup* é composto por um emulador de painel solar, um conversor *boost* CC-CC e um inversor monofásico CC-CA, conforme apresentado na Fig. 6 [10]-[11]. A aplicação padrão do funcionamento deste *setup* consiste na definição de um valor da irradiância do emulador do painel solar, e como resultado tem-se uma variação na intensidade da luz de uma lâmpada conectada à saída do inversor. Diante desta aplicação, pode-se pensar em um cenário de escala reduzida, onde a saída do inversor representa a rede ou uma geração distribuída e a lâmpada uma carga ou o consumidor.

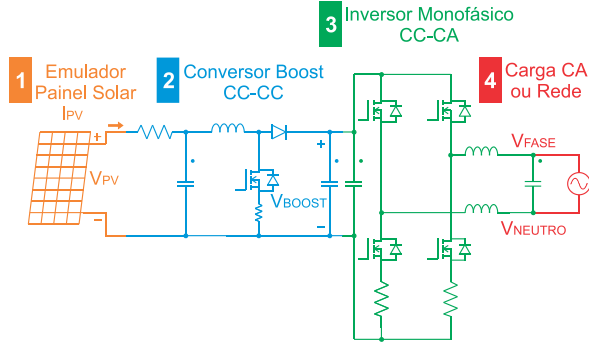


Fig. 6. Etapas do *setup* de escala reduzida.

Para a verificação experimental, quatro conjuntos de testes são apresentados: (a) testes com sinais conhecidos gravados na memória interna do medidor, esta etapa visa testar os algoritmos desenvolvidos sem considerar as dinâmicas da conversão analógica/digital e da instrumentação; (b) testes com sinais conhecidos gerados através de uma fonte confiável, esta etapa considera a dinâmica da conversão analógica/digital; (c) testes com o *setup* de escala reduzida, esta etapa visa a verificação mais próxima de um caso real de um consumidor conectado à rede ou à uma geração distribuída; (d) testes em condições nominais de operação utilizando uma carga resistiva. Estas quatro etapas de validação possuem como objetivo, avaliar o funcionamento do medidor utilizando valores teóricos conhecidos, valores reais de um *setup* de escala reduzida e de uma carga resistiva alimentada com tensão de 127V. Para as quatro etapas de validação, a interface proposta foi utilizada para a obtenção dos parâmetros elétricos e de qualidade de energia.

A. Testes dos Algoritmos

A primeira etapa para a validação dos dados apresentados pelo medidor proposto consistiu na utilização de sinais de tensão e corrente conhecidos, apresentados na Fig. 7, os quais foram implementados internamente no medidor. Os resultados da primeira etapa de validação estão apresentados na Tabela I. O erro absoluto foi calculado considerando-se os valores teóricos como exatos e do medidor como aproximados. O erro relativo percentual foi calculado entre a relação do erro absoluto e do valor considerado como exato. Pode-se verificar, através dos resultados, que os algoritmos implementados estão

funcionando de maneira satisfatória. Alguns parâmetros apresentaram uma pequena variação, onde o maior erro relativo obtido foi no indicador de qualidade de energia relacionado à distorção harmônica total de tensão (DTT), que equivale a um erro absoluto de 0,015.

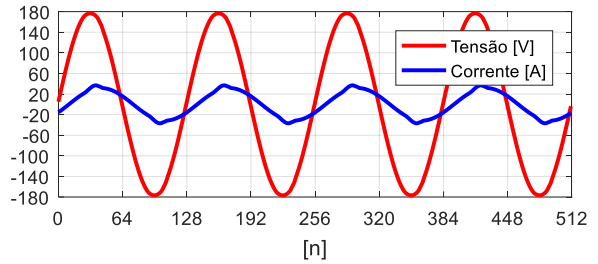


Fig. 7. Sinais de tensão e corrente da primeira etapa de validação.

TABELA I. PARÂMETROS DA PRIMEIRA ETAPA DE VALIDAÇÃO.

	Teórico	Medidor	Erro Absoluto	Erro Relativo Percentual
V [RMS]	125,984	125,990	0,006	0,005
f [Hz]	60,000	60,000	0,000	0,000
I [RMS]	23,781	23,781	0,000	0,001
P [W]	2594,021	2594,109	0,088	0,003
S [VA]	2996,035	2996,214	0,179	0,006
Q [Var]	1482,901	1483,977	1,076	0,073
FP	0,866	0,866	0,000	0,021
DTT [%]	0,515	0,530	0,015	2,961
DTC [%]	7,116	7,160	0,044	0,623

B. Testes com o Gerador de Funções

O sinal de tensão apresentado na Fig. 8 contém componentes harmônicas até a vigésima quinta ordem. Este sinal foi transferido para o gerador de funções e utilizado para a segunda etapa de validação. Na Fig. 9 estão apresentadas as componentes harmônicas até a décima terceira ordem, onde estão apresentados os valores teóricos, do medidor e experimentais. Embora os resultados do medidor também sejam experimentais, todos os resultados apresentados na coluna identificada como “experimental” são resultados obtidos através da utilização de um osciloscópio. Comparando-se os valores do medidor com os valores teóricos, o maior erro absoluto obtido foi de 0,011V na componente fundamental. Comparando-se os resultados experimentais, o maior erro absoluto também ocorreu na componente fundamental, que equivale a 0,013V.

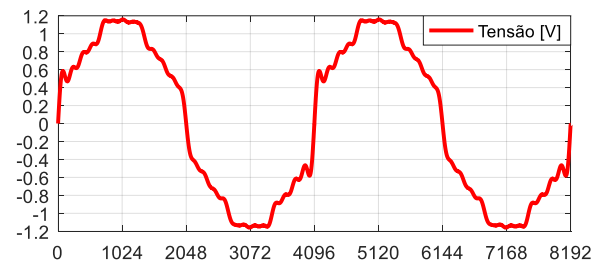


Fig. 8. Sinal de tensão gerado pelo gerador de funções com harmônicas de até 25ª ordem.

Embora não tenham sido apresentados mais resultados na primeira e segunda etapa de validação, foram realizados mais testes considerando-se diferentes cenários, como por exemplo: a presença de componentes harmônicas específicas, sendo elas

pares ou ímpares, a presença de diferentes tipos de cargas, sendo elas, resistivas, resistivas/indutivas ou não lineares. Através dos resultados obtidos das duas etapas de validação, pode-se verificar que o tratamento de dados do medidor mostrou-se adequado quando comparado com os valores teóricos conhecidos.

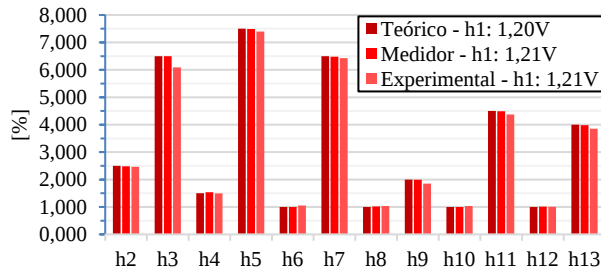


Fig. 9. Harmônicas de tensão em porcentagem das componentes fundamentais da segunda etapa de validação.

C. Testes com o Setup de Escala Reduzida

A terceira etapa de validação consistiu na utilização do *setup* escala reduzida. Realizou-se uma variação no valor da irradiância do emulador do painel solar de 0,2 até 0,8kW/m², e os respectivos parâmetros experimentais foram obtidos e comparados com os valores fornecidos pelo medidor. Nas Tabelas II e III é possível visualizar estes valores, que de modo geral, excluindo-se a potência reativa, apresentaram-se bastante próximos dos valores experimentais. Comparando-se os parâmetros elétricos, o erro relativo percentual, considerando-se os valores obtidos através do medidor como os valores exatos, variou de 0,017% até 2,842%. Em relação a potência reativa, teoricamente, esta deveria ser nula, pois trata-se de uma carga resistiva, porém o medidor apresentou valores próximos de 0,1VAr, enquanto que os resultados experimentais foram superiores chegando até o valor de 1,680VAr. Os indicadores de qualidade de energia relacionados às distorções harmônicas totais de tensão apresentaram um erro relativo percentual que variou de 0,02% até 6,742%, enquanto que o erro relativo percentual das distorções totais de corrente variou de 1,238% até 14,571%.

As distorções harmônicas totais de tensão foram calculadas de acordo com as especificações do PRODIST [12], onde considerou-se até a quadragésima componente harmônica. Embora não há especificações para as componentes harmônicas de corrente no PRODIST [12], para fins de testes, foram consideradas as mesmas condições das especificadas para tensão. Para todas as irradiâncias foram calculadas as harmônicas individuais, porém, para fins de exemplo, na Fig. 10 estão apresentadas as componentes harmônicas individuais de tensão e corrente expressas em porcentagem das componentes fundamentais até a décima terceira ordem para a irradiância de 0,8kW/m². As diferenças entre os valores do medidor dos valores experimentais estão geralmente relacionadas com a segunda e terceira casa decimal.

Para a verificação da detecção de VTCDs, considerou-se uma tensão nominal de 13,40V referente a irradiação de 0,6kW/m². Variando-se a irradiação e consequentemente os valores de tensão na carga, foi possível simular uma VTCD.

Nos testes realizados, considerou-se as irradiâncias de 0,2 e 0,4kW/m² para simular afundamentos de tensão, e uma irradiância de 0,8kW/m² para simular uma elevação de tensão. Na Fig. 11 é apresentada uma forma de onda com a ocorrência de três VTCDs. Para esta forma de onda, o medidor registrou uma elevação momentânea, um afundamento temporário e um afundamento momentâneo com duração de 2,07s, estes resultados podem ser visualizados na Fig. 12.

TABELA II. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA IRRADIÂNCIAS DE 0,20 E 0,40 kW/m².

	0,20 kW/m ²		0,40 kW/m ²	
	Medidor	Experimental	Medidor	Experimental
V [RMS]	5,793	5,780	9,920	9,880
f [Hz]	60,048	59,990	60,030	60,050
I [RMS]	0,883	0,906	1,173	1,180
P [W]	5,066	5,210	11,589	11,700
S [VA]	5,113	5,240	11,638	11,700
Q [VAr]	0,038	0,556	0,062	0,902
FP	0,991	0,994	0,996	0,997
DTT [%]	4,450	4,150	3,480	3,460
DTC [%]	4,290	4,060	3,500	2,990

TABELA III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA IRRADIÂNCIAS DE 0,60 E 0,80 kW/m².

	0,60 kW/m ²		0,80 kW/m ²	
	Medidor	Experimental	Medidor	Experimental
V [RMS]	13,390	13,400	16,456	16,400
f [Hz]	60,030	60,020	60,013	60,040
I [RMS]	1,382	1,390	1,548	1,550
P [W]	18,459	18,500	25,430	25,300
S [VA]	18,505	18,600	25,474	25,400
Q [VAr]	0,100	1,020	0,143	1,680
FP	0,998	0,998	0,998	0,998
DTT [%]	3,390	3,370	3,260	3,160
DTC [%]	3,360	3,070	3,230	3,190

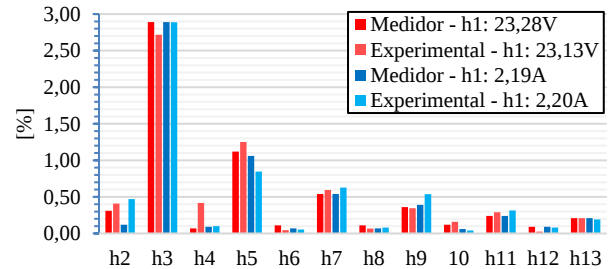


Fig. 10. Harmônicas de tensão e corrente em porcentagem das componentes fundamentais para uma irradiância de 0,8 kW/m².

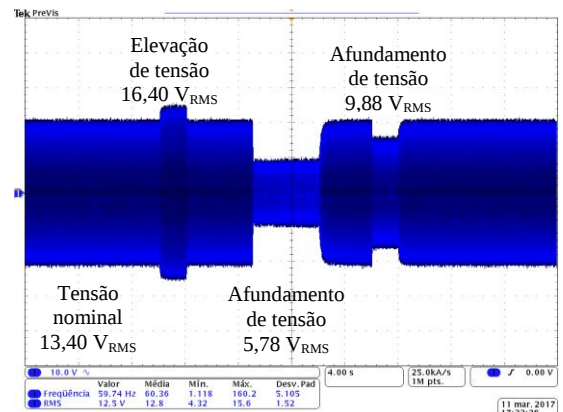


Fig. 11. Variações de tensão de curta duração (10V/div, 4s/div).

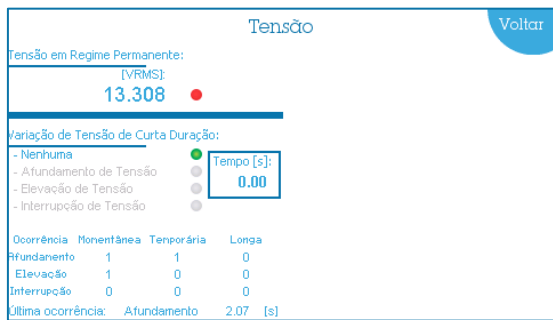


Fig. 12. Tela do módulo de tensão da interface proposta.

D. Testes em Condições Nominais de Operação

A quarta etapa de validação consistiu na utilização de um inversor monofásico, onde utilizou-se uma referência conhecida com a presença de componentes harmônicas de segunda até a oitava ordem, sendo que a frequência fundamental deste sinal era 60Hz. A diferença entre as amplitudes de cada harmônica era de 1%, sendo que começou com a de segunda ordem com 12% e terminou com a de oitava ordem com 6% da tensão eficaz nominal de 127V. A carga resistiva de $16,667\Omega$, alimentada com a tensão nominal, teoricamente, resulta em uma corrente de 7,62A. Na Tabela IV estão apresentados os valores experimentais obtidos e na Figura 13 estão apresentadas as comparações entre as componentes harmônicas individuais. Os resultados apresentaram comportamento semelhante aos resultados apresentados do *setup* de escala reduzida, onde a maior diferença está relacionada com a potência reativa.

TABELA IV. PARÂMETROS DA QUARTA ETAPA DE VALIDAÇÃO.

	Experimental	Medidor	Erro Absoluto	Erro Relativo Percentual
V [RMS]	128,802	129,913	1,111	0,862
f [Hz]	59,991	60,011	0,020	0,033
I [RMS]	7,581	7,668	0,087	1,150
P [W]	972,000	990,783	18,783	1,932
S [VA]	974,000	996,238	22,238	2,283
Q [VAR]	57,000	-7,876	64,876	113,818
FP	0,998	0,995	0,003	0,301
DTT [%]	24,130	23,880	0,250	1,036
DTC [%]	24,000	24,080	0,080	0,333

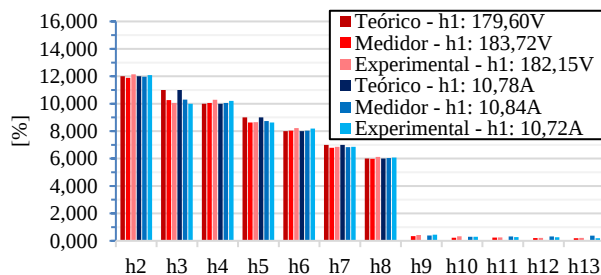


Fig. 13. Harmônicas de tensão e corrente em porcentagem das componentes fundamentais da quarta etapa de validação.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os medidores inteligentes são equipamentos essenciais para o funcionamento adequado das redes inteligentes. Devido a sua ampla capacidade de executar diferentes tarefas, faz-se

necessário a utilização de ferramentas que auxiliem e acelerem a etapa de validação dos dados fornecidos pelos medidores inteligentes. Neste trabalho, utilizou-se um *setup* de escala reduzida que permitiu a obtenção dos parâmetros elétricos diante de diferentes condições de funcionamento. Através das quatro etapas de validação, foi possível verificar o funcionamento da etapa de tratamento de dados, a qual é responsável por fornecer as informações de interesse para o consumidor e para a concessionária.

A interface proposta permitiu o monitoramento de parâmetros elétricos e de qualidade de energia, e também a obtenção dos valores experimentais de forma rápida e simplificada. Sua tela principal apresenta de maneira resumida as principais informações sobre o estado atual da rede. Para a obtenção de informações mais detalhadas do estado da rede, o consumidor pode interagir com a interface acessando o módulo de interesse. A utilização de indicadores visuais facilita a compreensão de determinados parâmetros quanto aos seus limites de operação recomendados por normas regulamentadoras.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] A. Dedé, D. Della Giustina, S. Rinaldi, P. Ferrari, A. Flammini and A. Vezzoli, "Smart meters as part of a sensor network for monitoring the low voltage grid," *2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Zadar, 2015, pp. 1-6.
- [2] G. R. Barai, S. Krishnan and B. Venkatesh, "Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review," *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, London, ON, 2015, pp. 138-145.
- [3] V. C. Gungor *et al.*, "Smart Grid and Smart Homes: Key Players and Pilot Projects," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 18-34, Dec. 2012.
- [4] C. De Capua and E. Romeo, "A Smart THD Meter Performing an Original Uncertainty Evaluation Procedure," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 4, pp. 1257-1264, Aug. 2007.
- [5] K. Koziy, B. Gou and J. Aslakson, "A Low-Cost Power-Quality Meter With Series Arc-Fault Detection Capability for Smart Grid," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1584-1591, July 2013.
- [6] D. Alahakoon and X. Yu, "Smart Electricity Meter Data Intelligence for Future Energy Systems: A Survey," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 425-436, Feb. 2016.
- [7] W. Angelino de Souza, F. Pinhabel Marafao, E. Verri Liberado, I. Severino Diniz and P. J. Amaral Serni, "Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 158-165, Jan. 2015.
- [8] F. Benzi, N. Anglani, E. Bassi and L. Frosini, "Electricity Smart Meters Interfacing the Households," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4487-4494, Oct. 2011.
- [9] S. C. Chapra and R. P. Canale, "Numerical Methods for Engineers", 6th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 2010.
- [10] M. Bhardwaj and B. Subharmanya, "Solar explorer kit hardware and control reference guide", Texas Instruments, Tech. Rep., 2016.
- [11] M. Bhardwaj and B. Moore, "Implementing photovoltaic inverter system with ethernet monitoring using C2000 microcontrollers on solar explorer kit", Texas Instruments, Tech. Rep., 2016.
- [12] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST", Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica - Revisão 8, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.
- [13] NBR, IEC 61000-4-30, "Técnicas de medição e ensaio – Métodos de medição de qualidade da energia, Compatibilidade Eletromagnética", ABNT, 67p., Rio de Janeiro, 2011.