

ERROS EM MEDIDORES ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA, CONSIDERANDO-SE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Guilherme de A. e Melo¹, Leonardo P. Sampaio², Marcos G. Alves¹, Rodrigo A. N. de Oliveira¹, José. F. R. da Silva³, Carlos. A. Canesin¹

¹UNESP-Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira – SP, Brasil

²UTFPR-Campus de Cornélio Procopio, Cornélio Procopio – PR, Brasil

³ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A., Campinas – SP, Brasil

e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br

Resumo – Com o objetivo de avaliar a adequação dos medidores bidirecionais nos sistemas de Geração Distribuída (GD), este trabalho apresenta a análise de erros de medição de energia elétrica, envolvendo vários fabricantes e modelos de medidores eletrônicos bidirecionais monofásicos, bifásicos e trifásicos, considerando-se cenários de fluxos bidirecionais de energia em baixa tensão, os quais refletem a qualidade de energia de diversas plantas com instalações de GD fotovoltaica e eólica. Os ensaios foram realizados por meio de uma montagem experimental específica, envolvendo um sistema automatizado de operação, com equipamentos de elevada exatidão, considerados como padrão de medição. Realizando-se três repetições, os testes determinaram os erros de medição de energia ativa e reativa para cada modelo de medidor ensaiado. Desenvolvido para a concessionária Elektro Eletricidade e Serviços S.A., os resultados foram agregados em um aplicativo para análise e avaliação de medidores de energia elétrica instalados em pontos de conexão de microgeração distribuída. Paralelamente, com o intuito de estudar as consequências do sistema, instalações de GD implantadas na área de concessão da Elektro são apresentadas de forma sumária nesse trabalho.

Palavras-Chave – Erros de Medição de Energia Elétrica, Fluxo Bidirecional de Energia Elétrica, Geração Distribuída.

MEASUREMENT ERRORS OF ELECTRONIC METERS, CONSIDERING DISTRIBUTED GENERATION SCENARIOS

Abstract – In order to evaluate the bidirectional meters adequacy to the Distributed Generation (DG) Systems, this paper presents the electric energy measurement errors analysis, considering different manufacturers of single-phase, two-phase and three-phase models of electronic power meters, where photovoltaic and wind distributed power generations are considered connected in low voltage scenarios. Laboratory tests were developed using a specific experimental set, specially designed for it, where an automatic system employs high precision power analyzers, which are considered as reference power meters. The laboratory tests computed the active and reactive power

measurements errors for each considered power meter model, considering three repetitions per model. The results were compiled by a software developed exclusively for analysis of metering effectiveness, considering distributed power generation scenarios at the Elektro Eletricidade e Serviços S.A. concession area. Simultaneously, in order to evaluate the system consequences, distributed power generation were implemented into the company area concession and are summarized presented in this paper.

Keywords – Bidirectional Electrical Power Flow, Distributed Generation, Electrical Energy Measurement Errors.

I. INTRODUÇÃO

Tendo em vista o desenvolvimento do setor de energia elétrica no sentido da expansão da geração distribuída em âmbito global, as empresas distribuidoras de energia elétrica devem se adequar às resoluções normativas, sendo o Brasil regido pela REN nº482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [1], que estabelece as condições gerais para instalação de medidor bidirecional ao consumidor proprietário de micro ou minigeração, conforme o módulo 3 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição) [2].

Levando em conta o aumento das cargas não lineares, tanto para equipamentos residenciais como industriais, as quais impõem distorções harmônicas de correntes no sistema [3]-[5], os medidores de energia devem possuir métodos de cômputo de energia adequados para tais condições. Nos medidores eletrônicos, o maior problema para os cálculos de energia ativa e reativa não reside nas distorções das correntes, mas sim nas de tensões, provocadas pela penetração harmônica de correntes nos sistemas e assimetrias nas tensões, dentre outros fatores. Agências fiscalizadoras, como o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), devem assegurar a qualidade e eficácia de medidores de energia elétrica comercializados e instalados no país, com o auxílio da Diretoria de Metrologia Legal (DIMEL), em conformidade com as regulamentações nacionais da ANEEL e normas vigentes. Entretanto, as condições de distorções nas tensões e correntes consideradas para os testes de exatidão desses equipamentos, conforme normas instituídas no país, são menos críticas que as encontradas em alguns ramais de linhas de distribuição de energia elétrica [6]-[8].

Artigo submetido em 06/01/2016. Primeira revisão em 27/03/2016. Aceito para publicação em 24/06/2016 por recomendação do Editor Convidado Leandro Michels.

Em um medidor eletrônico, a exatidão das medições de energia ativa e reativa não dependem apenas da exatidão e resposta em frequência de seus sensores de tensões e correntes, e de seus subsistemas de condicionamento, mas também dos métodos utilizados para o cômputo destas variáveis. No cenário de Geração Distribuída (GD), onde o fluxo de potência é bidirecional, os medidores devem identificar o sentido de fluxo e armazená-los em campos distintos, sendo que a exatidão dos cálculos conta também com a influência dos subsistemas citados [9], [10]. Desta forma, a adequação dos sistemas de medição deveria ser um compromisso basilar para os fabricantes de medidores bidirecionais de energia elétrica, visando não somente o menor custo, mas também a garantia de suas exatidões para medições de energia elétrica ativa e reativa, quando da presença de Geração Distribuída (GD), considerando-se o estado da arte da metrologia destes parâmetros [11]-[13].

Neste contexto, vários modelos de medidores de energia elétrica monofásicos, bifásicos e trifásicos, de medição direta (diretamente conectado ao consumidor) e indireta (com o auxílio de transformadores de potencial e de corrente), de diversos fabricantes, foram avaliados mediante ensaios experimentais. Tais ensaios resultaram na obtenção dos erros de medição de energia elétrica (ativa e reativa) em fluxo bidirecional, contribuindo para que a concessionária selecione, de forma mais criteriosa, os medidores a serem empregados nas futuras instalações com GD. Para avaliar os erros de forma precisa, os ensaios utilizaram como padrão de referência um analisador de energia com classe de exatidão 0,1% (Yokogawa WT3000).

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para a execução de uma adequada análise dos erros de medição, eliminando-se a possibilidade de erros laboratoriais de manipulação, foi desenvolvida uma montagem experimental totalmente automatizada. O sistema utiliza uma fonte de tensão programável, bidirecional, para simular a rede de distribuição de energia elétrica, um conjunto de cargas, um conversor CC/CA (inversor) capaz de injetar potências ativa e reativa no sistema e um aplicativo que gerencia e controla completamente o aparato experimental. As funcionalidades do aplicativo incluem, a programação das formas de onda de tensões pré-estabelecidas a serem ensaiadas sequencialmente de maneira automática, o processo de “burn-in” dos equipamentos, a coleta dos dados e seu armazenamento para os Medidores Sob Ensaio (MSE) e o medidor padrão.

A análise experimental pode ser aplicada nos quatro quadrantes de operação do fluxo de potência, definidos de acordo com a Figura 1, o que descreve um fluxo de energia

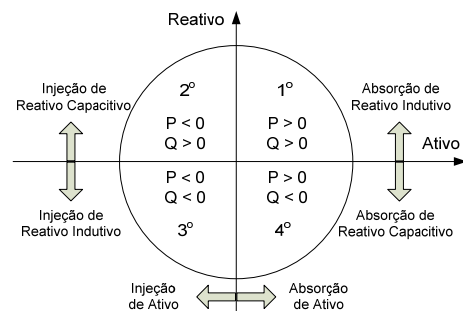


Fig. 1. Convenção adotada para fluxos de potências em quatro quadrantes.

bidirecional, tanto para energia ativa, quanto para energia reativa. Quando o inversor programável se encontra desligado, o fluxo de potência é imposto apenas pela fonte programável, a qual emula a rede, operando no 1º ou no 4º quadrante, o que é definido exclusivamente pela carga, respectivamente indutiva ou capacitiva.

Considerando apenas a componente fundamental da corrente e seu fator de deslocamento, a análise pode ser simplificada da seguinte forma. Se o inversor injeta energia no sistema, o fluxo de potência pode ser imposto no sentido contrário, dependendo do valor da potência ativa injetada pelo equipamento, bastando para isso que a potência ativa demandada pela carga seja inferior à injetada pelo inversor. Além disso, a característica reativa da leitura do sistema, aferida pelo medidor de quatro quadrantes, pode ser modificada em função da injeção de potência ativa, comportando-se como se segue. Se o suprimento de potência ativa fornecido pelo inversor é inferior à potência ativa de uma carga com característica indutiva, a medição do sistema completo apresenta característica de carga indutiva (1º Quadrante); se o inversor fornece potência ativa maior que a da carga, a medição apresenta característica de injeção capacitiva (2º Quadrante), sendo o dual verdadeiro.

A Figura 2 apresenta o comportamento descrito anteriormente, sendo as formas de onda representadas pelas nomenclaturas a seguir e definidas por (1).

- $v(t)$: Tensão da rede (cor vermelha);
- $i(t)$: Corrente no medidor (cor vermelha, tracejada);
- $iz(t)$: Corrente na carga (cor preta, traço e ponto);
- $iInv(t)$: Corrente do inversor (cor preta).

$$i(t) = iz(t) + iInv(t) \quad (1)$$

Considerando o caso em que o inversor proporciona injeção de energia reativa, é possível controlar o fator de deslocamento da corrente registrada pelo medidor de quatro quadrantes. Desta forma, a injeção de potência no sistema pode ter característica puramente ativa quando o inversor produz exatamente a potência reativa solicitada pela carga.

Como a injeção de potência reativa indutiva é equivalente à absorção da potência reativa capacitiva, sendo o dual verdadeiro, a característica reativa aferida pelo medidor também pode ser modificada pelo controle da injeção de potência reativa no sistema. Considerando uma geração de potência ativa inferior à da carga, se o suprimento de potência reativa indutiva fornecido pelo inversor é inferior à potência reativa de uma carga com característica indutiva, a medição do sistema completo mantém a característica de carga indutiva (1º Quadrante); se o inversor fornece potência reativa indutiva maior que a solicitada pela carga, a medição apresenta característica de carga capacitiva (4º Quadrante), sendo o dual verdadeiro. A Figura 3 apresenta tal descrição e também é regida por (1).

Para a realização dos ensaios, um programa desenvolvido em C++ gerencia todos os requisitos envolvidos no processo, como tempo de “burn in”, configurado para 5 minutos, tempo de ensaio, configurado para 60 minutos e trocas de cenários, realizadas automaticamente. Os dados coletados são compostos pelas formas de onda de correntes, tensões, energia ativa e reativa processadas pelo analisador de potência do inversor (GD). São coletados ainda os resultados aferidos pelo

Potência Ativa Superior à da Carga

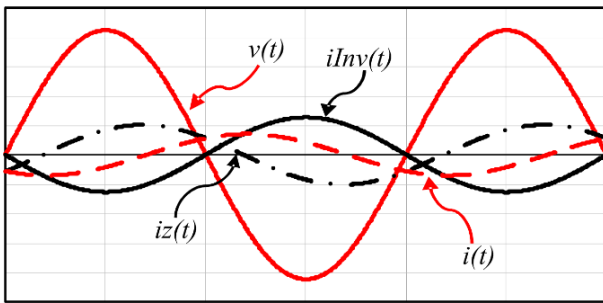


Fig. 2. Correntes resultantes para quando a potência ativa do inversor é maior que a potência ativa da carga.

Potência Reativa Superior à da Carga

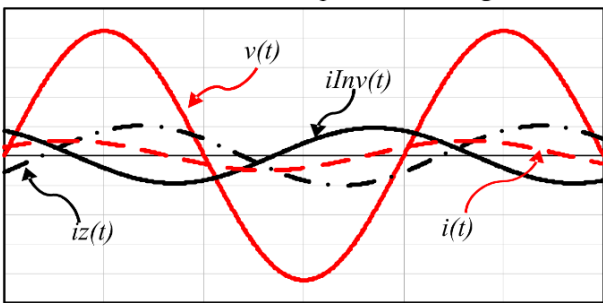


Fig. 3. Correntes resultantes para quando a potência reativa do inversor é maior que a potência reativa da carga.

analisador padrão e pelos MSE, além dos dados de um termohigrômetro, compostos pela temperatura e umidade ambiente.

Devido aos métodos disponibilizados para a leitura da energia elétrica processada por cada medidor sob ensaio, duas possibilidades foram exploradas. Entre elas, a leitura dos dados por intermédio da saída do usuário (SU) possibilita o ensaio de uma maior quantidade de medidores simultaneamente, enquanto a utilização dos diodos emissores de luz (LED) de calibração dos medidores são utilizados nos casos de ausência da SU.

A configuração dos dispositivos empregados nos ensaios experimentais pode ser dividida em cinco categorias principais, as quais estão explicitadas no diagrama esquemático apresentado pela Figura 4 e relacionadas a seguir:

- Dispositivos envolvidos na geração dos perfis de tensão e simulação da rede de distribuição de energia elétrica;
- Dispositivos envolvidos na medição e na aquisição dos dados;
- Dispositivos envolvidos na injeção de potência ativa e reativa no sistema;
- Cargas utilizadas para os ensaios;
- Medidores eletrônicos sob ensaio.

A. Geração dos Perfis de Tensão e Simulação da Rede

Uma fonte trifásica programável (California Instruments - MX45) capaz de reproduzir formas de onda distorcidas, contemplando até a quinquagésima harmônica, e que ainda possibilita o fluxo bidirecional de corrente, simulando a rede de distribuição de energia elétrica, foi utilizada para a geração dos perfis de tensão.

B. Medição e Aquisição de Dados

A medição das formas de onda de tensões e de correntes, das potências envolvidas no processo e da energia processada

é realizada pelo analisador de energia WT3000, com exatidão de 0,06% para tensões e correntes, denominado padrão. Os cálculos de potência e energia são executados pelo mesmo equipamento por meio de uma função de cálculos avançados, em conformidade com a teoria PQ [14], utilizando uma taxa de aquisição de 200.000 pontos por segundo.

Tais resultados de medição são enviados a um sistema de gerenciamento, desenvolvido em linguagem C++, mediante comunicação GPIB.

Simultaneamente, as informações de potências processadas pelos MSE são enviadas ao sistema de gerenciamento, empregando um equipamento desenvolvido no Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), o qual possui um FPGA para estabelecer a comunicação simultânea entre vários MSE e o computador, onde se encontra residente o sistema de gerenciamento desenvolvido.

C. Injeção de Potência Ativa e Reativa no Sistema

A injeção de potência reativa no sistema requer um controle adequado para garantir a continuidade e exatidão no controle do fluxo de energia. Um inversor com tais características foi desenvolvido no LEP, possuindo controle multi-malhas, LMI com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade, o qual é controlado por uma plataforma DSpace integrada a um computador.

D. Cargas Utilizadas para os Ensaios

As cargas acopladas ao sistema são constituídas por um banco programável de resistores, associados a uma máquina de indução acoplada a um compressor e controlada por um inversor trifásico, conferindo a característica não linear da carga.

E. Medidores Eletrônicos sob Ensaio

Como apresentado anteriormente, a coleta dos valores de energia fornecidos pelos MSE é realizada por um dispositivo FPGA, o qual concentra as informações de todos os medidores e as envia ao sistema de gerenciamento utilizando uma porta serial RS232 do computador.

Dois maneiras diferentes de coletar as informações dos MSE foram implementadas, uma para quando os medidores possuem a interface de comunicação com o usuário, denominada saída do usuário (SU), e outra para quando existem apenas os LED empregados na calibração dos equipamentos.

A existência da SU, nos MSE, possibilita a análise de até seis equipamentos concomitantemente, o que não ocorre quando a coleta dos dados é realizada pelo monitoramento dos LED, permitindo a análise de apenas três medidores concomitantemente.

A preparação dos ensaios experimentais realizados neste trabalho, baseia-se em parâmetros que podem influenciar nas corretas medições de energia ativa e reativa.

Os parâmetros responsáveis pela geração de reativos são identificados como: Distorção Harmônica Total de Corrente (DHT_i), resultante das cargas instaladas, representada por (2); Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_v) no ponto de conexão das cargas e da GD, representada por (3); fator de deslocamento entre componentes fundamentais $\cos(\phi_1)$, identificado pelo ângulo de deslocamento entre tensões e correntes fundamentais de cada fase apresentado por (4), identificando a característica indutiva ou capacitiva do conjunto de cargas instaladas no ambiente de ensaios.

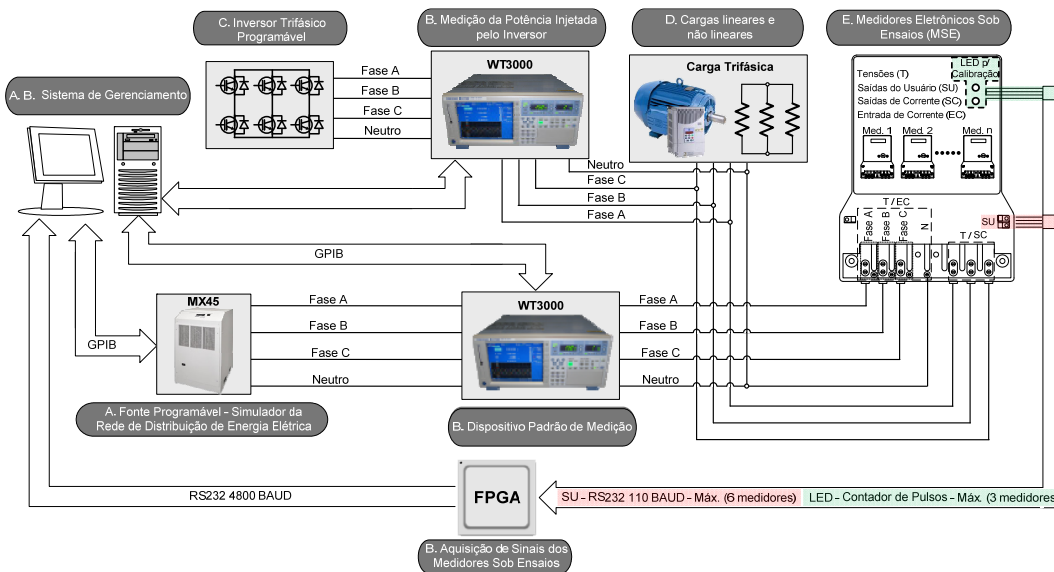


Fig. 4. Diagrama geral de blocos do “set” experimental utilizado para ensaios dos medidores eletrônicos bidirecionais de energia elétrica.

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (2)$$

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (3)$$

$$\cos(\theta_1) = \cos(\delta_1 - \theta_1) \quad (4)$$

Sendo: $v_1(t) = V_1 \text{sen}(\omega_1 t + \delta_1)$
 $i_1(t) = I_1 \text{sen}(\omega_1 t + \theta_1)$.

Erros de medição observados pelos MSE podem ocorrer em função da exatidão dos sensores de tensão e corrente e em função do método de cálculo empregado pelo equipamento, fontes estas consideradas inerentes aos MSE, as quais se deseja avaliar apenas considerando-se as respostas dos mesmos para as medições de energia elétrica ativa e reativa, para cenários pré-determinados. Entretanto, essas fontes de erro também podem sofrer influências do desequilíbrio de tensões e do desbalanceamento de carga, embora esses casos não integrem o propósito desse trabalho, estas análises foram realizadas.

Pela própria característica de operação das cargas, as correntes de fase se diferenciam ligeiramente, provocando diferentes quedas de tensões sobre as impedâncias de linha da rede. O desequilíbrio de tensão pode ser calculado pela avaliação de suas componentes simétricas. Entretanto, uma vez que o sistema trifásico de tensões do arranjo de ensaios não apresenta assimetrias de fase, pela simplicidade da análise aqui apresentada, a equação utilizada para a determinação desse parâmetro, proposta pelo CIGRÉ, é dada por:

$$FDV(\%) = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5)$$

onde: $\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$.

O desbalanceamento de carga é dado em porcentagem, tomando-se uma das fases como referência, que apresenta por definição uma corrente de 100%. Desta forma, as demais correntes podem ser apresentadas como percentual do valor eficaz da fase referência. Entretanto, como informado previamente, este trabalho apresenta apenas resultados de

análise de erros considerando-se tensões equilibradas e carga balanceada, dadas as restrições de número de páginas, o que será explorado em futuros trabalhos.

III. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Considerando-se os principais equipamentos e fabricantes no território nacional, a Tabela I apresenta nomes de modelos e fabricantes fictícios para os MSE, os quais foram analisados pela realização de 9 ensaios pré-programados, que são apresentados na Tabela II. Foram ensaiados três perfis diferentes de tensão; senoidal, com DHT_v de 3% e de 5%, sendo todos os cenários constituídos por um banco trifásico resistivo de 600W e um motor de 1cv alimentado por um inversor. Os ensaios se distinguem pela variação da DHT_v e pela potência injetada pelo inversor (GD), conferindo um nível distinto de DHT_i para cada ensaio. A Tabela II ainda apresenta a corrente em (pu) que flui através dos medidores bidirecionais, separados por categorias (de medição direta e indireta).

Uma foto do set experimental é apresentada na Figura 5 e um exemplo de caso, referente ao ensaio 6, é apresentado na Figura 6, cujo perfil de tensão apresenta 5% de DHT_v e a forma de onda de corrente apresenta níveis elevados de conteúdo harmônico (36% de DHT_i).

As formas de onda de tensões foram adquiridas em cenários reais de distribuição em baixa tensão (BT), sendo denotadas com índice i . Já as de espessura menor, com índice r , são as reconstituídas experimentalmente para a execução dos ensaios, conforme exemplo da Figura 6. Evidentemente, as formas de onda de tensão reconstituídas com a fonte programável MX45 não são exatamente iguais às coletadas em campo, devido à impedância de saída da fonte. Entretanto, apresentam grande aderência e podem ser empregadas sem prejuízo das análises. As formas de onda das correntes foram coletadas nos ensaios laboratoriais e decorrem das cargas conectadas ao sistema, assim como, dos níveis de potências ativa e reativa envolvidos. Nota-se que, a menos do ângulo de defasagem da carga, as formas de onda de tensão e de corrente estão em contra-fase no exemplo da Figura 6, indicando que o fluxo de corrente ocorre da carga para a rede, emulada pela fonte MX45.

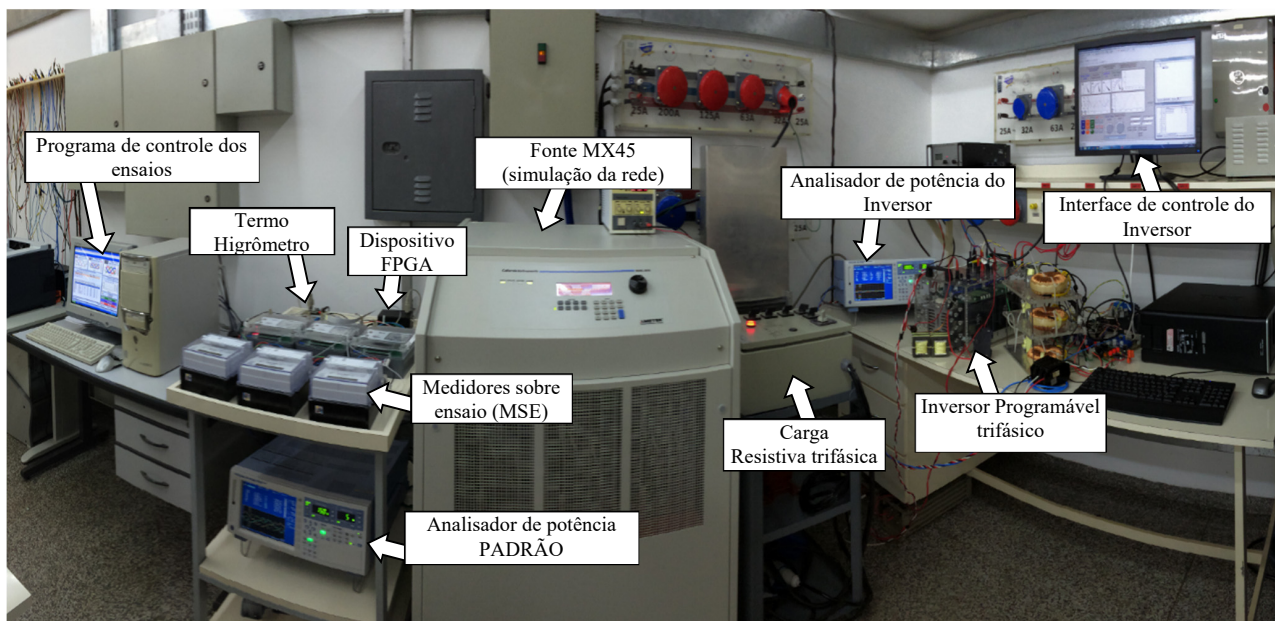


Fig. 5. Sistema de medição e monitoramento de erros para medidores eletrônicos bidirecionais de energia elétrica, em ambiente de GD.

TABELA I
Exatidão dos Medidores Ensaados

Fabric.	Número de Fases	Tipo de Medição	Corrente Nominal (A)	Classe de Exatidão
X	3	Indireta	2,5 (10)	C (0,5%)
	3	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	2	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	1	Direta	15 (120)	B (1,0%)
Y	3	Indireta	2,5 (10)	C (0,5%)
	3	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	2	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	1	Direta	15 (100)	B (1,0%)
Z	3	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	2	Direta	15 (120)	B (1,0%)
	1	Direta	15 (100)	B (1,0%)

TABELA II
Cenários para os Ensaios Desenvolvidos.

Grupo	Ensaio	Perfil		I_{med} [pu]		Característica do ensaio
		DHT _v	DHT _i	Indir	Dir.	
1	1	0%	46%	1,16	0,19	Injeção de 2 kW
	2	3%	52%	1,16	0,19	
	3	5%	49%	1,16	0,19	
	4	0%	33%	1,54	0,26	
2	5	3%	39%	1,54	0,26	Injeção de 2 kW e 1kvar indutivo
	6	5%	36%	1,54	0,26	
	7	0%	32%	1,60	0,27	
3	8	3%	40%	1,60	0,27	Injeção de 2 kW e 1kvar capacitivo
	9	5%	37%	1,60	0,27	

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com a finalidade de uma avaliação mais rápida e intuitiva dos resultados, foi criado um código de cores para representar a magnitude dos erros de cada ensaio e de cada medidor. A Tabela III apresenta o código de cores supracitado, que se divide em faixas de valores pré-fixados de acordo com a Classe de Exatidão (CE) de cada modelo de medidor eletrônico de energia elétrica.

Observa-se que os erros de medição observados nas medidas de energia ativa, apresentados na Tabela IV, não atendem a CE em muitos casos, indicando que as grandes distorções de corrente impossibilitam as medições adequadas

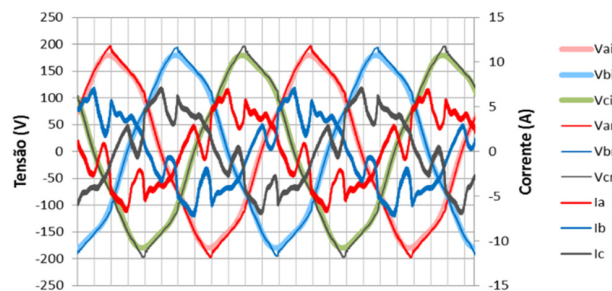


Fig. 6. Formas de onda referentes ao ensaio 6.

e precisas, da energia ativa, aferidas pelos medidores ensaiados. Com relação aos erros para energia reativa, apresentados na Tabela V, nota-se um valor extremamente elevado do erro para os três primeiros ensaios, porém, nestes casos, a energia reativa resultou em valores extremamente reduzidos. Contudo, nos demais ensaios, ocorrem erros ainda maiores que os observados para a energia ativa, comprometendo seriamente a exatidão destes medidores para mensuração de fluxos bidirecionais de energia reativa em ambientes de GD em BT.

TABELA III
Faixas de Classificação para os Erros de Medição

Faixa do erro (%)	Classe B	Classe C
Dentro da CE	0,00% - 1,00%	0,00% - 0,50%
Entre 1x e 2x a CE	1,01% - 2,00%	0,51% - 1,00%
Entre 2x e 3x a CE	2,01% - 3,00%	1,01% - 1,50%
Entre 3x e 10x a CE	3,01% - 10,00%	1,51% - 5,00%
Acima de 10x da CE	> 10,01%	> 5,01%

V. GERENCIAMENTO DE ERROS DE MEDIÇÃO

Visando a facilidade de análise dos dados coletados e processados, um “software” de apresentação dos dados, denominado “Smart Meter Analyzer”, contendo o banco de dados dos ensaios e algumas ferramentas de análise de erro para cada medidor ensaiado, foi desenvolvido em linguagem “C++ builder”.

TABELA IV
Médias Aritméticas dos Erros Relativos de Energia Ativa, Organizadas por Ensaio e por Modelo de Medidor

Ensaio	Indireto						Direto					
	Trifásico			Trifásico			Bifásico			Monofásico		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,35	0,34	-0,55	0,41	0,30	-0,23	-4,22	-4,11	0,17	0,83	-0,15	
2	0,26	0,58	-0,60	0,30	0,58	-0,23	-5,15	-4,97	-0,04	0,69	-0,14	
3	0,30	0,38	-0,48	0,29	0,57	-0,26	-5,55	-5,55	-0,06	0,81	0,08	
4	1,80	1,79	-0,22	0,60	1,37	-0,05	-4,20	-4,48	0,47	0,87	-0,46	
5	2,04	1,84	-0,09	0,53	1,39	-0,09	-3,87	-4,66	-0,12	0,74	0,04	
6	2,17	2,00	-0,25	0,61	1,44	-0,05	-4,66	-4,28	-0,05	0,81	0,02	
7	-0,47	-0,18	-0,24	0,47	1,87	-0,05	-3,04	-4,03	0,22	0,96	0,08	
8	-0,35	-0,05	-0,12	0,40	-0,25	-0,08	-4,03	-3,63	-0,22	0,69	0,13	
9	-0,40	-0,18	-0,19	0,40	-0,21	-0,13	-4,37	-4,01	-0,20	0,76	-0,14	

TABELA V
Médias Aritméticas dos Erros Relativos de Energia Reativa, Organizadas por Ensaio e por Modelo de Medidor

Ensaio	Indireto						Direto					
	Trifásico			Trifásico			Bifásico			Bifásico		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	-161,90%	-110,88%	-37,60%	----	----	-84,12%	62,46%	----	----	-18,49%		
2	-14,62%	-52,91%	-7,30%	----	----	-29,74%	26,87%	----	----	-10,08%		
3	-27,80%	-20,57%	-6,12%	66,05%	----	-17,18%	-7,14%	47,97%	----	-7,81%		
4	-1,48%	-1,34%	-0,55%	-0,48%	----	-1,25%	-0,54%	-0,54%	----	-0,14%		
5	-1,43%	-1,48%	-0,58%	-0,78%	----	-1,14%	-0,54%	-0,81%	----	-0,17%		
6	-1,96%	-1,61%	-0,87%	-1,15%	----	-1,46%	-0,83%	-1,31%	----	-0,49%		
7	1,80%	1,66%	0,04%	0,51%	----	1,72%	0,18%	0,67%	----	1,40%		
8	1,73%	2,17%	0,06%	0,85%	----	1,35%	0,16%	1,06%	----	1,45%		
9	2,24%	2,32%	0,16%	1,32%	----	1,72%	0,38%	1,11%	----	1,63%		

O menu principal do referido “software” é apresentado na Figura 7, o qual contém os ícones apresentados em detalhes na sequência.



Fig. 7. Tela de apresentação do Menu Principal do “software”, “Smart Meter Analyzer”.

1) *Medidores*: Apresenta a lista de medidores envolvidos nos ensaios, especificando o fabricante, modelo, quantidade de fases e tipo de medição para cada amostra (direta/indireta).

2) *Cenários de ensaios*: Apresenta uma janela com todos os dados referentes aos ensaios, denominada “Visualizador de Ensaio”, conforme exemplo apresentado na Figura 8. Essa janela possui diversas abas, nas quais o usuário poderá navegar para visualizar as formas de onda de tensões e correntes processadas pela carga ou injetada pelo inversor de GD. Assim como, a verificação das variáveis mensuradas para cada ensaio e cenário, envolvendo valores eficazes de tensões e correntes, potências elétricas (aparente/ativa/reactiva) e energia elétrica (ativa e reativa), acumuladas para um período padrão de ensaio de uma hora. São apresentadas tabelas com 1400 valores de coleta de energia ativa e reativa para cada medidor ensaiado e o analisador padrão de energia, ao longo de uma hora, ou seja, uma coleta a cada 2,57s, conforme exemplo da Figura 9 para energia reativa. Esses dados também são apresentados em forma de gráficos, possibilitando a visualização do

comportamento da energia acumulada ao longo do tempo. Existem ainda algumas abas para apresentação da análise do erro dos ensaios, em forma de tabela e de gráficos, conforme exemplo da Figura 10. Finalizando a referida janela, uma aba apresenta as leituras de temperatura e umidade coletadas a cada minuto durante cada ensaio.

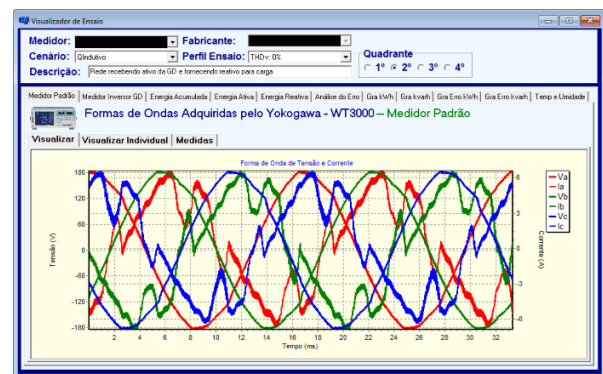


Fig. 8. Janela de exibição dos cenários e banco de dados dos ensaios.

Medição	Eno Relativo (%)	M1	M2	M3
643	1567	0,4246	0,4230	0,4250
644	1570	0,4263	0,4240	0,4250
645	1572	0,4259	0,4250	0,4250
646	1574	0,4265	0,4250	0,4270
647	1577	0,4272	0,4260	0,4270
648	1579	0,4279	0,4270	0,4280
649	1582	0,4286	0,4270	0,4290
650	1584	0,4292	0,4280	0,4290
651	1587	0,4299	0,4290	0,4300
652	1589	0,4306	0,4290	0,4310
653	1592	0,4313	0,4300	0,4310
654	1594	0,4319	0,4310	0,4320
655	1596	0,4325	0,4310	0,4330
656	1599	0,4332	0,4320	0,4330
657	1601	0,4339	0,4330	0,4340
658	1604	0,4345	0,4330	0,4340
659	1606	0,4352	0,4340	0,4350
660	1609	0,4359	0,4350	0,4360
661	1611	0,4366	0,4350	0,4360

Fig. 9. Dados de ensaios, medidor padrão e medidores sob ensaios, para energia reativa (dados medidores omitidos devido sigilo contratual).

3) *Erro por medidor*: Esse ícone ativa uma janela que permite a seleção de um medidor específico com o auxílio de uma janela “pop-up”, apresentando os erros relativos de energia ativa e reativa para cada ensaio, em forma de tabela de dados, como mostra a Figura 11. Adicionalmente, a janela apresentando o maior e o menor valor dos erros encontrados para aquele medidor. Os valores de erros apresentados consistem em uma média aritmética dos erros encontrados para três amostras (repetições) de cada modelo de medidor.

4) *Erro por fabricante*: Esse ícone ativa uma janela que apresenta os mesmos dados observados no item descrito anteriormente, mostrando todos os medidores de um único fabricante, escolhido por uma janela “pop-up”, e apresentados em formato de tabela de dados, como mostra a Figura 12.

5) *Guia do usuário*: Esse ícone consiste em um manual de ajuda apresentado em formato de navegador web, explicando como utilizar o “software” adequadamente e explorando as características técnicas das ferramentas desenvolvidas.

6) *Sobre*: Para incluir os créditos de desenvolvimento do projeto é apresentada uma janela com todas as informações referentes aos pesquisadores, financiadores e agências envolvidas, conforme apresentado na Figura 13.

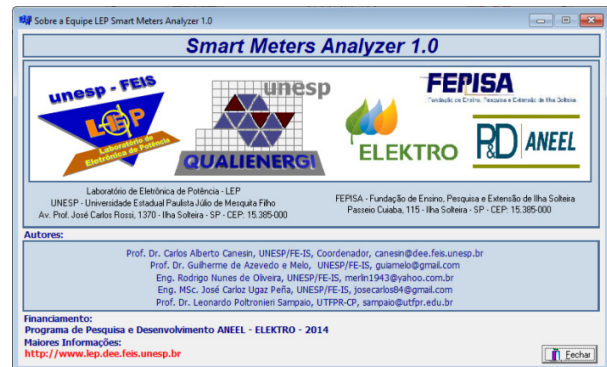


Fig. 13. Janela de créditos aos envolvidos na pesquisa.

N°	Cenário	DHTv	Descrição	Quad	Média do Erro Relativo	
					Energia Ativa kW (%)	Energia Reativa kvar (%)
1	Indutivo	0%	Rede recebendo ativo da GD e fornecendo reativo para a carga	2	0.17	0.50
2	Indutivo	3%	Rede recebendo ativo da GD e fornecendo reativo para carga	2	0.05	0.56
3	Indutivo	5%	Rede recebendo ativo da GD e fornecendo reativo para carga	2	0.22	0.94
4	ICapacitivo	0%	Rede recebendo ativo e reativo da GD	3	0.22	-0.05
5	ICapacitivo	3%	Rede recebendo ativo e reativo da GD	3	0.07	-0.08
6	ICapacitivo	5%	Rede recebendo ativo e reativo da GD	3	0.17	-0.18
7	IZero	0%	Rede recebendo ativo da GD	3	0.55	32.53
8	IZero	3%	Rede recebendo ativo da GD	3	0.60	6.29
9	IZero	5%	Rede recebendo ativo da GD	3	0.41	5.42

Fig. 10. Janela de exibição dos erros para cada modelo de medidor (dados medidores omitidos devido sigilo contratual).

N°	Medidor	Modelo	THDv 0% - Erro%		THDv 3% - Erro%		THDv 5% - Erro%	
			E. Ativa	E. Reativa	E. Ativa	E. Reativa	E. Ativa	E. Reativa
1	M1		-0.02	-1.67	6.07	-2.04	0.86	-2.84
2	M2		0.46	-1.94	0.29	-2.54	0.14	-3.29
3	M3		0.11	-1.36	4.07	-1.91	0.26	-1.69
4	Méda		0.18	-1.66	0.05	-2.16	0.15	-2.34

Fig. 11. Apresentação de erros para determinado conjunto de ensaios e modelo de medidor (dados omitidos devido sigilo contratual).

N°	Cenário	DHTv	Descrição	Quad	Média do Erro Relativo	
					Energia Ativa kW (%)	Energia Reativa kvar (%)
1	Indutivo	0%	Rede recebendo ativo da GD e l.c	2	-1.82	1.45
2	Indutivo	3%	Rede recebendo ativo da GD e l.c	2	-2.05	1.40
3	Indutivo	5%	Rede recebendo ativo da GD e l.c	2	-2.17	1.56
4	ICapacitivo	0%	Rede recebendo ativo e reativo d	3	0.47	-1.80
5	ICapacitivo	3%	Rede recebendo ativo e reativo d	3	0.35	-1.73
6	ICapacitivo	5%	Rede recebendo ativo e reativo d	3	0.40	-2.23
7	IZero	0%	Rede recebendo ativo da GD	3	-0.35	161.90
8	IZero	3%	Rede recebendo ativo da GD	3	-0.26	14.25
9	IZero	5%	Rede recebendo ativo da GD	3	-0.32	27.59

Fig. 12. Janela de exibição dos erros para determinado fabricante, incluindo os modelos (dados omitidos devido sigilo contratual) na mesma tabela.

VI. INSTALAÇÕES DE GD IMPLANTADAS

Conforme se apresenta neste artigo, seis plantas de GD encontram-se com as instalações concluídas. As cidades escolhidas para tais instalações incluem Ilha Solteira, Rio Claro, São Vicente e Guarujá, no estado de São Paulo, como apresentado no mapa da Figura 14, as quais são listadas na Tabela VI. Observa-se que, por problemas do fornecedor e empresa instaladora, a única instalação ainda não implantada completamente consiste de um sistema fotovoltaico com acumulação de energia por meio de baterias apropriadas, destacada em itálico na Tabela VI.



Fig. 14. Mapa das áreas de concessão da Elektro e das localidades escolhidas para a instalação das plantas de GD com monitoramento remoto.

TABELA VI
Especificações Sumárias dos Equipamentos Instalados em Cada Localidade, às Quais Contemplam as Instalações de GD

CIDADE	LOCAL	Descrição	Pot. FV [Wp]	Pot. EOL [W]
Ilha Solteira	ELEKTRO	FV e EOL	1225	---
Ilha Solteira	UNESP - CCI	FV e EOL	3920	---
<i>Ilha Solteira</i>	<i>UNESP Campus 3</i>	<i>FV com acumulação</i>	<i>8000</i>	<i>---</i>
Rio Claro	ELEKTRO	FV e EOL	3920	1000
Rio Claro	UNESP	FV e EOL	1225	1000
Guarujá	ELEKTRO	FV e EOL	3920	6000
São Vicente	UNESP	FV e EOL	1225	6000

FV: Geração Fotovoltaica; EOL: Geração Eólica; Pot.: Potência; CCI: Centro de Convivência Infantil.

Alguns exemplos das instalações são apresentados entre a Figura 15 e a Figura 18, exemplificando a instalação fotovoltaica de 3920Wp no Centro de Convivência Infantil da UNESP de Ilha Solteira e as instalações, eólica e FV da ELEKTRO de Guarujá.



Fig. 15. Geração fotovoltaica instalada na UNESP-CCI de Ilha Solteira.

Como pode ser observado na Figura 16, além do condicionamento da energia processada pelo inversor, as instalações contam com um sistema de sincronização dos dados de geração de potência diretamente no site do fabricante do inversor, realizado pelo equipamento Webbox. Adicionalmente, um analisador de qualidade de energia elétrica (QEE), denominado PQube (PQiaB - PSL) coleta informações relevantes de QEE, enviando todos os dados via 3G, para constituírem um banco de dados de GD.

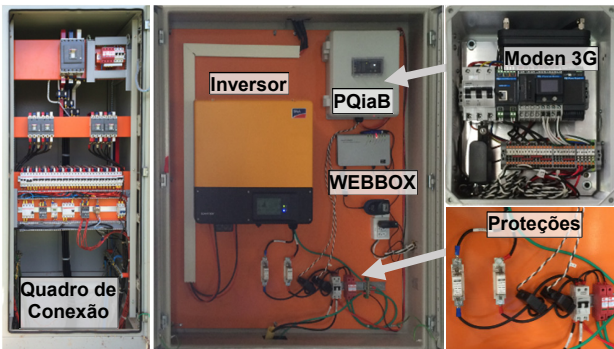


Fig. 16. Instalação de Inversor com proteção de conexão, comunicação de dados e analisador de QEE na UNESP-CCI de Ilha Solteira-SP.

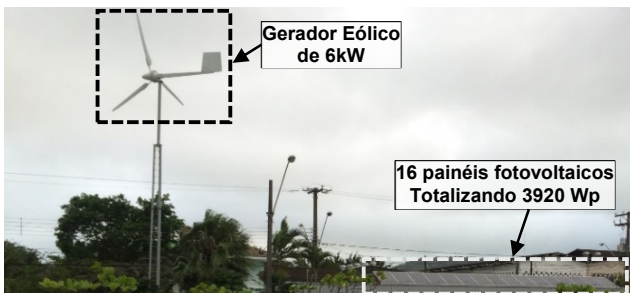


Fig. 17. Geradores eólico e fotovoltaico, instalados na Elektro de Guarujá-SP.

Como apresentado nas Figuras 16 e 18, as instalações com duas tecnologias de microgeração também contam com sistemas de análise de QEE e comunicação de dados com o site do fabricante e o banco de dados de QEE, observando-se a maior quantidade de equipamentos para gerenciamento individual da energia de cada gerador (fotovoltaico e eólico).



Fig. 18. Equipamentos de condicionamento de energia, proteção e medição para os sistemas de GD instalados na Elektro de Guarujá-SP.

VII. SISTEMA DE MONITORAMENTO DE DADOS

Com a finalidade de monitoramento automático da geração de potência e da avaliação da QEE no PAC de cada planta, foi desenvolvido um “software” (Micro GD_Elektro), que agrega todos os dados coletados nas instalações, sendo a tela inicial apresentada na Figura 19.

O MicroGD_Elektro destaca cada região contemplada com uma ou mais instalações de GD, apresentando mais detalhes sobre as plantas e permitindo que o usuário escolha qual delas deseja consultar, bastando selecionar a região. Dois bancos de dados são disponibilizados para cada instalação, e acessados através dos retângulos alaranjados destacados na Figura 20. A primeira opção apresenta o monitoramento de QEE pelo PQube, conforme Figura 21, sendo os dados armazenados no site do fabricante do inversor apresentados conforme Figura 22, acessado de forma integrada e automática ao “software” desenvolvido.

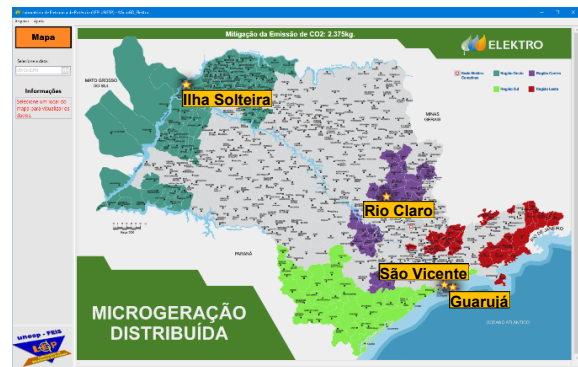


Fig. 19. Tela inicial do programa de monitoramento MicroGD_Elektro.



Fig. 20. Tela de apresentação da região que contém instalação de GD.

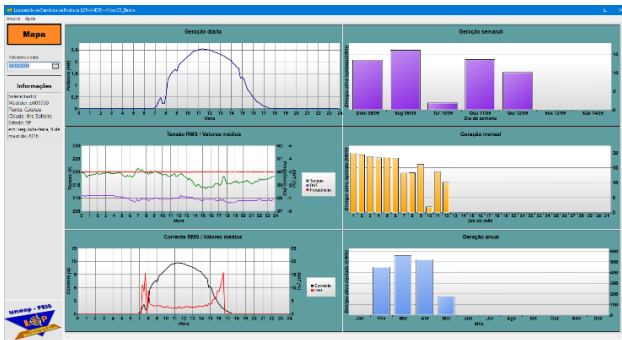


Fig. 21. Tela de apresentação dos dados coletados com o analisador de QEE (PQube).

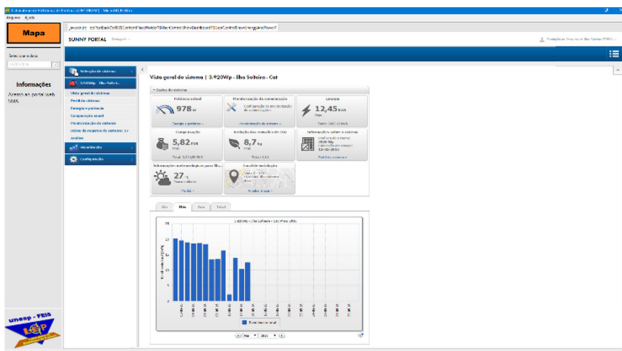


Fig. 22. Tela com os dados do site do fabricante com as informações de geração de cada planta, apresentada dentro do programa de monitoramento.

VIII. CONCLUSÕES

Mediante os ensaios realizados em onze diferentes medidores, envolvendo três grandes fabricantes distintos, contando com equipamentos de medição direta e indireta, pode-se afirmar que os medidores do fabricante X se destacam entre os modelos de medição direta, em função dos menores erros relativos apresentados para nove ensaios/cenários distintos. Observa-se que foram utilizadas três repetições para todos os ensaios (ensaios em três amostras para cada medidor analisado) e que todos os dados e análises referentes aos ensaios foram organizados em um “software” especialmente desenvolvido para a concessionária Elektro. Para os modelos de medição indireta, fornecidos apenas pelos fabricantes X e Y, os mesmos apresentam desempenhos similares para energia reativa, conferindo um desempenho ligeiramente melhor ao modelo do fabricante Y. No aspecto geral, o fabricante X apresentou melhor desempenho para medições bidirecionais em quatro quadrantes. Entretanto, observa-se que todos os medidores analisados para medição indireta apresentam erros muito superiores às suas classes de exatidão, para determinadas condições de medição de energia ativa, exibindo erros ainda maiores para a medição de energia reativa. Destacam-se ainda os elevadíssimos erros de energia reativa em cenários de fluxo bidirecional em quatro quadrantes para equipamentos de medição indireta, resultando em até $2x_{CE}$ para os modelos Y e Z de medição direta, mesmo com a exclusão dos três primeiros cenários/ensaios para a análise de erros de todos os modelos.

Com as plantas de GD implantadas nos diversos PAC escolhidos e o “software” especialmente desenvolvido para o monitoramento das plantas, pretende-se obter resultados suficientes para análise de impacto da GD no que se refere às

medições bidirecionais de energia, na continuidade da pesquisa. Há de se observar ainda que não foram utilizados TPs e TCs para os equipamentos de medição indireta aqui avaliados, uma vez que os ensaios foram realizados dentro das faixas de medições para os medidores respectivos, podendo então os erros analisados serem ainda maiores para os medidores bidirecionais de medição indireta.

Portanto, há de se desenvolver ações no sentido de uniformizar tecnologias de medição e algoritmos de cálculos de energia elétrica (ativa e reativa), para os cenários próximos e futuros da medição em instalações com GD, dados os elevadíssimos erros observados nas análises aqui apresentadas e tendo em vista que a expansão dessa modalidade de geração no Brasil apresenta previsão otimista.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à concessionária Elektro Eletricidade e Serviços S.A. pela colaboração e pelo financiamento da pesquisa, assim como, ao Programa de P&D da ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa ANEEL nº482, Abr. 2012.
- [2] ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, 2012.
- [3] T. Taviananant, S. Surisunthon, “Impacts of distributed generation on voltage sag assessment in Thailand's distribution systems”, in *Proc. of ICHQP*, pp. 624-629, 2012.
- [4] K. D. A. Munasinghe, S. G. Abeyratne, “Power Quality and Harmonic Loads”, in *Proc. of First International Conference on Industrial and Information Systems*, pp. 52-57, 2006.
- [5] V. E. Wagner, J. C. Balda, D. C. Griffith, “Effects of harmonics on equipment”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, nº 2, pp. 672-680, Abr.1993.
- [6] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, Luis C. Origa, “Sistema de Medição e Modelação de Erros em Medidores de Energia Elétrica Ativa”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 13, nº 1, pp. 33-43, Fev. 2008.
- [7] Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (estáticos) - Método de Ensaio, ABNT, NBR 14520:2011, 2011.
- [8] ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica, PRODIST Módulo 5 – Sistemas de Medição, 2011.
- [9] C. Xiao, L. Zhao, T. Asada, “An Overview of Integratable Current Sensor Technologies”, in *Prof. of IEEE Industry Applications Conference – 38° IAS*, vol. 2, pp. 1251-1258, 2013.
- [10] S. Puzović, B. Koprivica, A. Milovanović, M. Đekić, “Analysis of Measurement Error in Direct and Transformer-Operated Measurement Systems for Electric Energy and Maximum Power Measurement”, in *Proc. of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies-Europe*, pp. 389-398, 2014.

- [11] S. Svensson, "Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions - the significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities." Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg - Sweden, 1999.
- [12] F. P. Marafão, H. K. M. Paredes, L. C. P. da Silva, "Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories", in *Proc. of International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, pp. 15-18, 2010.
- [13] A. Fazio, L. P. Sampaio, M. A. G. de Brito, G. A. e Melo, C. A. Canesin, "Comparative analysis for reactive energy measurement methodologies, under non-sinusoidal conditions in three-phase four-wire circuits", in *Proc. of COBEP Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 494-501, 2011.
- [14] J. L. Willems, "A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, nº 4, pp. 523-527, August 1992.

DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme de Azevedo e Melo, obteve doutorado em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica de Potência, pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2010), desenvolvendo projetos de pesquisa voltados para o aproveitamento de fontes alternativas e renováveis de energia elétrica. Atualmente atua como professor colaborador junto à Universidade Estadual Paulista, Campus de Ilha Solteira.

Leonardo Poltronieri Sampaio, possui Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (2013), campus de Ilha Solteira - SP, na área de Eletrônica de Potência. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Campus de Cornélio Procópio e professor do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Possui experiência nas áreas de aproveitamento de fontes de energia alternativa e renovável, desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise em plataformas Java, C/C++ e PHP/MySQL.

Rodrigo Alessandro Nunes de Oliveira, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2007). Atualmente é aluno de doutorado na UNESP de Ilha Solteira. Tem experiência na área de Robótica, Mecatrônica e Automação.

José Francisco Resende da Silva, Possui Doutorado em Engenharia Elétrica pela USP Universidade de São Paulo (2015). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Materiais Elétricos, Manutenção e Operação do Sistema. MBA em Gestão Empresarial pela FGV, 2009. MBA em Gerenciamento de Projetos pela FGV, 2011. Professor Executivo, IBE-Campinas, conveniada da FGV, em cursos de Pós-Graduação em Administração de Empresas desde 2009. Professor no curso de MBA na Área de Gerenciamento de Projetos no IBE-Campinas desde 2012. Professor no Curso de MBA-Especialização em Gerenciamento de Projetos do SENAC de Jundiaí. Professor no Centro Universitário Nossa Senhora do Patrocínio. Atua como Especialista Sênior em Pesquisa e Desenvolvimento na Diretoria de Recursos humanos da Empresa Elektro. Responsável pela criação de projetos para os Programas de Pesquisa e Desenvolvimento, Programa de Eficiência Energética e Responsabilidade Social (incluindo Gerenciamento de Projetos) da Empresa Elektro junto à ANEEL.

Carlos Alberto Canesin, recebeu seu diploma de Doutor em Engenharia Elétrica pela UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC) em 1996. Iniciou carreira docente no Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP-Faculdade de Ilha Solteira (SP) em 1985, onde atualmente é Professor Titular. O Professor Canesin é pesquisador do CNPq e da FAPESP, sendo Editor Associado da IEEE Transactions on Power Electronics desde 2003. O Prof. Canesin foi Editor da Revista Eletrônica de Potência, editada pela SOBRAEP, onde permanece como membro do Conselho Editorial. Foi Presidente da SOBRAEP de Nov/2004 a Out/2006, onde permanece como membro do Conselho Deliberativo. Atualmente, desde 2010, é membro do Conselho Estadual de Políticas Energéticas do Estado de São Paulo (CEPE).