

# PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DE ENSAIOS DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO

**Cassio Bortolosso** – cassio.bortolosso@gmail.com  
**Luiz Marciano Rosenbach** – rosenbach@terra.com.br  
**César Wihelm Massen Prieb** – cprieb@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

**Resumo.** Este artigo mostra a adequação de uma bancada experimental para a realização de ensaios de inversores fotovoltaicos conectados a redes de distribuição. Um algoritmo baseado em pós-processamento de medidas é apresentado como forma de automatizar parte dos testes requisitados por normas específicas com relação à qualidade de energia elétrica. Um esquema de conexões é proposto de modo a agilizar a reconfiguração dos equipamentos envolvidos em cada respectivo teste. Um exemplo de aplicação do pós-processamento proposto é apresentado com medições reais em um inversor monofásico conectado à rede elétrica.

**Palavras-chave:** Ensaio de Inversores, Sistemas Fotovoltaicos, Qualidade de Energia Elétrica.

## 1. INTRODUÇÃO

Os inversores fotovoltaicos são dispositivos de eletrônica de potência que convertem a energia em corrente contínua c.c. para corrente alternada c.a.

Os inversores podem ser controlados por tensão ou por corrente. Em sistemas fotovoltaicos é comum a utilização de inversores controlados por corrente de modo a injetar na rede c.a. A corrente relativa à potência c.c. disponibilizada por um arranjo de painéis fotovoltaicos submetidos a um determinado nível de radiação, vide Fig. 1.

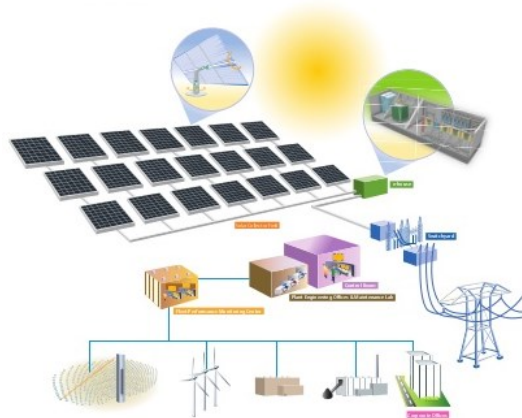


Figura 1 - Interface dos painéis solares à rede elétrica c.a.

A Fig. 2 mostra o esquema de um inversor fotovoltaico trifásico conectado à rede c.a.

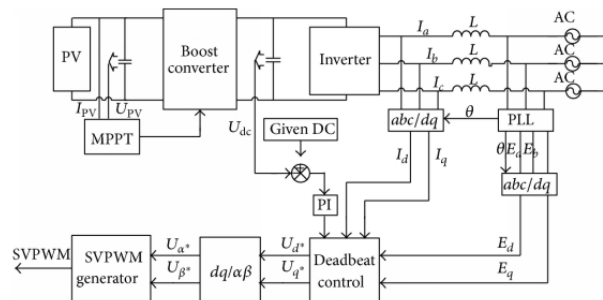


Figura 2 - Inversor conectado à rede.

A possibilidade de injetar corrente segundo métodos específicos de controle abre uma gama de possibilidades com relação à corrente efetivamente injetada na rede. Aspectos relativos à qualidade de energia são uma preocupação de normas específicas que delimitam valores máximos e mínimos de parâmetros de medição. Neste contexto, os fabricantes de inversores fotovoltaicos têm a preocupação em atender normas específicas que regulam a manutenção de padrões mínimos de qualidade com relação à energia injetada na rede elétrica c.a.

O crescimento do uso de energias renováveis como a solar tem impulsionado muitas pesquisas com relação a este assunto. O uso de unidades de geração no sistema de distribuição pode trazer benefícios com relação à redução da necessidade de expandir os sistemas de transmissão já existentes, visto que disponibiliza a energia próximo às cargas.

No entanto, a utilização de inversores em energia solar merece um estudo no sentido de possibilitar sua utilização sem causar distúrbios e outros efeitos indesejados na rede elétrica, tanto sob o ponto de vista da qualidade da energia disponibilizada, quanto aos serviços de manutenção típicos de redes de distribuição de energia elétrica. As normas que regulam os ensaios de inversores caminham na direção de estabelecer regras para a operação dos inversores; estas regras ganham um papel importante, principalmente quando o uso de inversores em energia solar fotovoltaica é considerado relevante no sistema de distribuição.

No Brasil, as principais normas que regulam os ensaios de inversores podem ser encontradas com elevado grau de detalhamento em ABNT<sup>1</sup> (2013) e ABNT<sup>2</sup> (2013). Estas normas são baseadas em recomendações que devem estar incluídas no funcionamento dos inversores. A tecnologia dos atuais inversores usados em sistemas fotovoltaicos permite que eles sejam programados em fábrica para cumprirem as exigências das normas citadas. As normas se referem a precauções com relação à segurança mostradas em IEC<sup>5</sup> (2010), IEC<sup>6</sup> (2011) e qualidade de energia elétrica mostradas em IEC<sup>1</sup> (2008), IEC<sup>2</sup> (2010), IEC<sup>3</sup> (2000) e IEC<sup>4</sup> (2008).

Com relação à segurança existe um cuidado no sentido de isolar completamente partes do sistema que possam ser alimentadas pelo sistema de distribuição tradicional assim como pelo inversor. Para isso, técnicas de anti-ilhamento devem ser testadas de modo a garantir que o desligamento de alimentadores por parte da distribuidora de energia seja suficiente para desenergizar o trecho considerado, dado que a energização pode ser proveniente também do inversor fotovoltaico. O procedimento para este teste pode ser encontrado em ABNT<sup>3</sup> (2012).

Alguns testes têm o objetivo de verificar a capacidade do inversor em reconhecer condições de rede que possam conduzi-lo a operar de maneira inadequada, o que pode levar o inversor a operar com correntes ou tensões acima do recomendado, podendo acarretar danos aos dispositivos eletrônicos usados na sua fabricação. Estes testes incluem a desconexão por sobre/sub tensão e sobre/sub frequência.

Sob o ponto de vista de qualidade de energia, existe uma preocupação no sentido de que a instalação de inversores em sistemas com geração distribuída não implique na deterioração da qualidade da energia elétrica disponível na rede. Parâmetros de medição de qualidade de energia típicos, como taxa de distorção harmônica e fator de potência, são levados em consideração neste caso. Além disso, a capacidade de ponderar potências ativa e reativa é avaliada no sentido de que inversor deve ajudar o sistema em tarefas típicas de suporte à rede, como a regulação de tensão e frequência (serviços ancilares).

Os ensaios de inversores são realizados por meio de 17 testes, onde parâmetros importantes de qualidade de energia são levados em consideração, como mostrado na Tab. 1.

Tabela 1 - Ensaio de Inversores fotovoltaicos conectados à rede.

NÚMERO	NOME DO ENSAIO
01	Cintilação
02	Injeção de componente contínua
03	Harmônicos e distorção de forma de onda
04	Fator de potência
05	Injeção/demanda de potência reativa
06	Sobre/sub tensão
07	Sobre/sub frequência
08	Controle da potência ativa em sobre frequência
09	Reconexão
10	Religamento automático fora de fase
11	Modulação de potência ativa
12	Modulação de potência reativa
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede (telecomandos)
14	Requisitos de suportabilidade a sub tensões decorrentes de faltas na rede
15	Proteção contra inversão de polaridade
16	Sobrecarga
17	Anti-ilhamento

## 2. METODOLOGIA PROPOSTA

Os ensaios de inversores apresentados na Tab. 1 podem ser feitos com equipamentos específicos e instrumentos de medição que incluem:

1. Simulador de arranjo fotovoltaico
2. Simulador de rede elétrica c.a.
3. Carga RLC configurável
4. Analisador de energia
5. Osciloscópios
6. Multímetros
7. Sensores – TP e TC

O simulador de rede c.a. é responsável por gerar condições de rede determinadas para os testes, as quais não são possíveis de controlar sem a sua utilização. Pode ser programado segundo condições de tempo e valores eficazes da tensão e frequência de saída, emulando condições adversas de rede, às quais o inversor deve ser submetido com o objetivo de verificar seu comportamento sob essas condições.

O simulador de arranjo fotovoltaico permite criar condições de teste estáticas referente à potência d.c., essenciais para testes e ensaios controlados. Seu uso é indispensável na realização dos ensaios visto que a condição de irradiação solar natural não é um fator controlável. A carga RLC configurável é utilizada para a realização do teste de anti-ilhamento, relacionado à questões de segurança envolvidas em inversores conectados à rede.

Os analisadores de energia em geral permitem fazer a aquisição e registro de medidas de qualidade de energia elétrica ao longo do tempo na forma de arquivos. Osciloscópios são usados de modo auxiliar nos ensaios, sobretudo em testes que exigem a monitoração da forma de onda amostrada. Multímetros auxiliam em verificações básicas de tensão e corrente, principalmente na preparação do ensaio (início dos testes). Sensores como transformadores de potencial e corrente (TP e TC) são usados para adequar os níveis de tensão e corrente às entradas do analisador de energia e/ou osciloscópios, além de serem úteis na constatação da presença/ausência destas variáveis.

A Fig. 3 mostra o diagrama de blocos simplificado da bancada experimental utilizada para a realização dos ensaios descritos na norma.

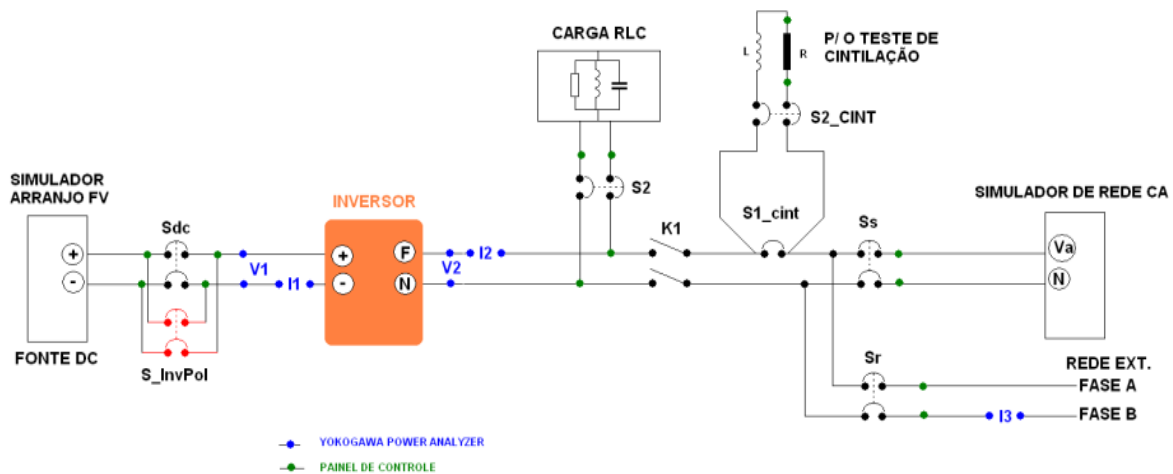


Figura 3 - Bancada experimental – principais elementos.

### 2.1. Arranjo de equipamentos em função do teste

A realização dos testes requer a conexão e desconexão dos equipamentos de medição e/ou cargas de teste. De acordo com o teste, os elementos usados devem ter suas conexões elétricas reconfiguradas conforme a necessidade.

Neste contexto convém a utilização de um esquema de chaveamento baseado em disjuntores e contactoras que permitam reconfigurar as conexões de maneira rápida, sem a necessidade de intervenções manuais na fiação utilizada.

O esquema elétrico mostrado na Fig. 4 permite a realização dos ensaios citados para os inversores monofásicos conectados à rede.

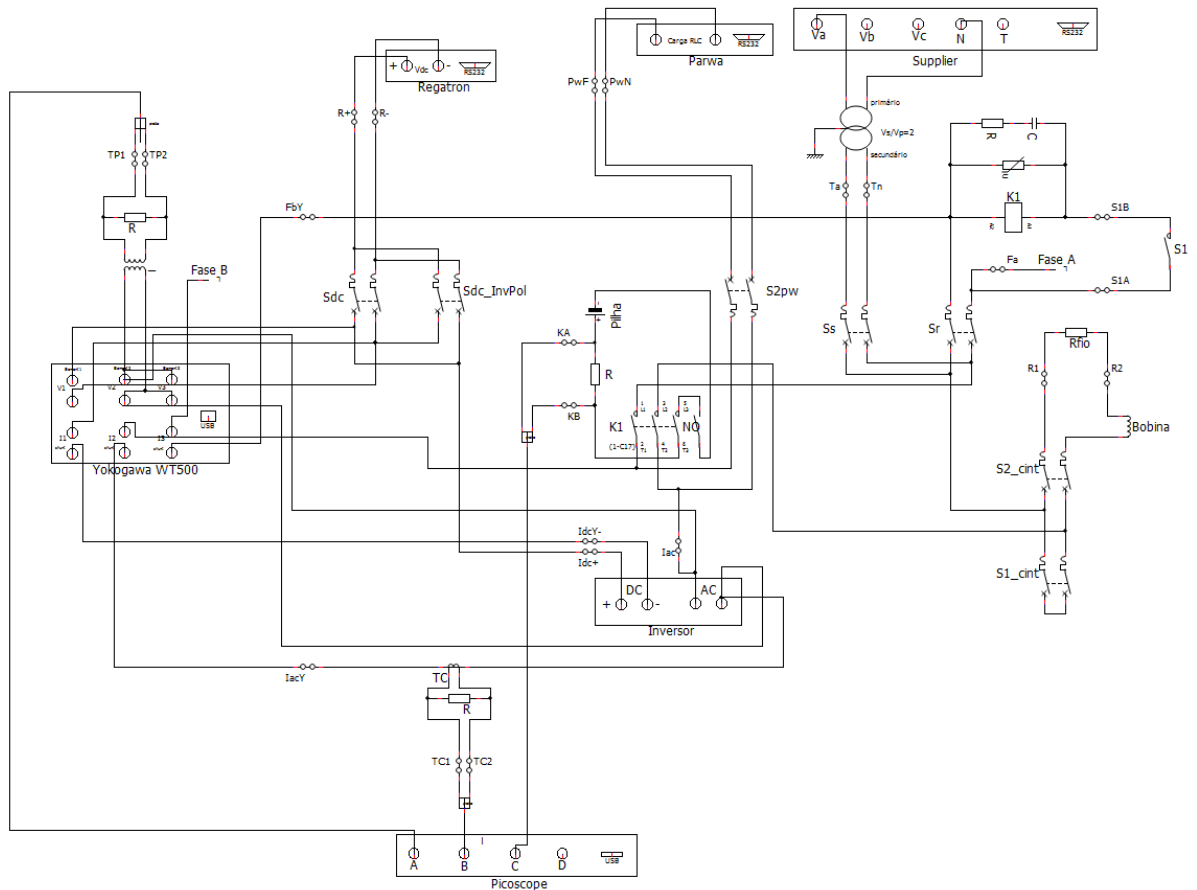


Figura 4 - Esquema elétrico para o ensaio de inversores.

A nomenclatura dos sinais está dada na Tab. 2.

Tabela 2 - Nomenclatura de sinais.

Nº	SINAL	ORIGEM	DESCRIÇÃO/OBSERVAÇÃO
1	R1	Resistência do ensaio de cintilação	Fio de cobre L= 80 m e A=1,5 mm <sup>2</sup>
	R2		
2	Ta	Saída do Transformador	O simulador de rede é ligado na entrada do transformador
	Tn		
3	Fa	Fase A	127 V Fase-Neutro
	FbY	Saída de Ish do analisador - Fase B	Ish do elemento 3 - Fase B entra no shunt: 127 V Fase-Neutro
4	PwF	Saída da carga RLC	Terminais de conexão da carga RLC
	PwN		
5	Iac	Saída c.a. do inversor	Ish elemento 2
	IacY	Saída de Ish analisador	
6	R+	Saída c.c. + do simulador FV	
	R-	Saída c.c. - do simulador FV	
7	Idc+	Saída c.c.+ do inversor	Ish elemento 1
	IdcY-	Saída de Ish analisador (c.c.-)	
8	KA	Canal C do Osciloscópio	Indicador de presença de rede (Vdc da pilha)
	KB		
9	S1A	Terminais de S1	Chave que desconecta o inversor da rede
	S1B		
10	TP1	Canal A do Osciloscópio	Medição de Tensão da rede
	TP2		
11	TC1	Canal B do Osciloscópio	Medição de Corrente injetada pelo inversor
	TC2		

De acordo com o ensaio, os disjuntores da Fig. 4 devem ser configurados em ligado (ON) ou desligado (OFF), conforme Tab. 3. O ensaio 09 é realizado na sequência dos ensaios 06 e 07, portanto não consta nesta tabela.

Tabela 3 - Estado das chaves.

ENSAIO	Sr	Ss	Sdc	SdcInvPol	S2 pw	S2 cint	S1 cint	S1
01	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON
02	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
03	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
04	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
05	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
06	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
07	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
08	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
10	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
11	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
12	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
13	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
14	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
15	ON	OFF	OFF/ON	ON/OFF	OFF	OFF	ON	ON
16	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
17	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON/OFF

A Tab. 4 descreve a função de cada disjuntor.

Tabela 4 - Função dos Disjuntores.

DISJUNTOR	EQUIPAMENTO A SER CONECTADO/DESCONECTADO (FUNÇÃO)
Sr	Rede c.a.
Ss	Simulador de rede c.a.
Sdc	Simulador de arranjo FV (+ -) c.c.
SdcInvPol	Simulador de arranjo FV – polaridade invertida(- +) c.c.
S2 pw	Carga RLC
S2 cint	Bobina e resistor (em série) do ensaio de cintilação
S1 cint	By-pass do teste de cintilação
S1	Contactora (quando OFF desconecta o inversor da rede)

A Fig. 5 mostra as instalações da bancada de testes que inclui o painel com as conexões elétricas conforme o esquema mostrado na Fig. 4.



Figura 5 - Painel usado para a reconfiguração das conexões.

## 2.2. Software de pós-processamento

Em geral a tarefa de ensaio de equipamentos é bastante repetitiva e necessita um grau de automatização das tarefas, sobretudo no que se refere à apresentação dos resultados na forma de um relatório com a apresentação de tabelas e gráficos que mostrem efetivamente o resultado de cada teste.

Além disso, ensaios como o de cintilação exigem equipamentos específicos para sua realização, cuja funcionalidade pode ser dada por meio do desenvolvimento de programas baseados em pós-processamento que reproduzam sua funcionalidade. Alguns ensaios (por exemplo, inversão de polaridade e desconexão por telecomandos) não necessitam de uma análise de medidas detalhada. Estes ensaios não estão citados na Fig. 6, porém sua importância é fundamental no contexto de ensaios de inversores relacionados à qualidade de energia.

Diante desta necessidade, propõe-se a implementação de um *software* desenvolvido no Matlab que faça o pós-processamento das medidas dos equipamentos citados na anteriormente, conforme Fig. 6, onde  $V_{dc}$  e  $I_{dc}$  são tensão e corrente do lado c.c. do inversor,  $V_{ac}$  e  $I_{ac}$  se refere ao lado c.a.,  $T_s=1/f_s$  é período de amostragem em segundos.

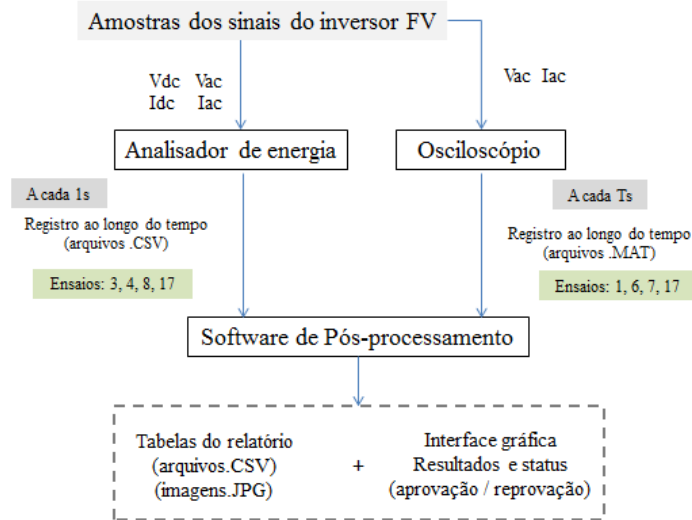


Figura 6 - Aquisição de dados e análise das medidas.

Aquisições de medidas a cada 1 s são suficientes para ensaios referentes ao analisador de energia. O uso do osciloscópio é necessário para alguns ensaios que requerem a análise da forma de onda e medições de tempo da ordem de ciclos da rede. Frequências de amostragem  $f_s$  da ordem de 13,2 kHz são suficientes para a amostragem dos sinais usados nas medições de tempo requisitadas nos ensaios correspondentes.

Com relação ao *software* de pós-processamento, há uma série de etapas a serem aplicadas que são comuns a vários ensaios, pode-se aproveitar blocos em comum, como a etapa referente à detecção do trecho válido (intervalo de tempo) para as medidas em cada carregamento.

Os ensaios exigem que o inversor seja testado em diferentes carregamentos, controlados por um simulador de arranjo fotovoltaico por meio de uma simulação estática (irradiação constante).

Primeiramente é necessário identificar no arquivo de medições de saída do analisador de energia, os intervalos de tempo correspondentes ao intervalo de medição para cada carregamento, em seguida verificar as medições para o ensaio respectivo. A Fig. 7 descreve as funcionalidades contidas no esquema de pós-processamento proposto.

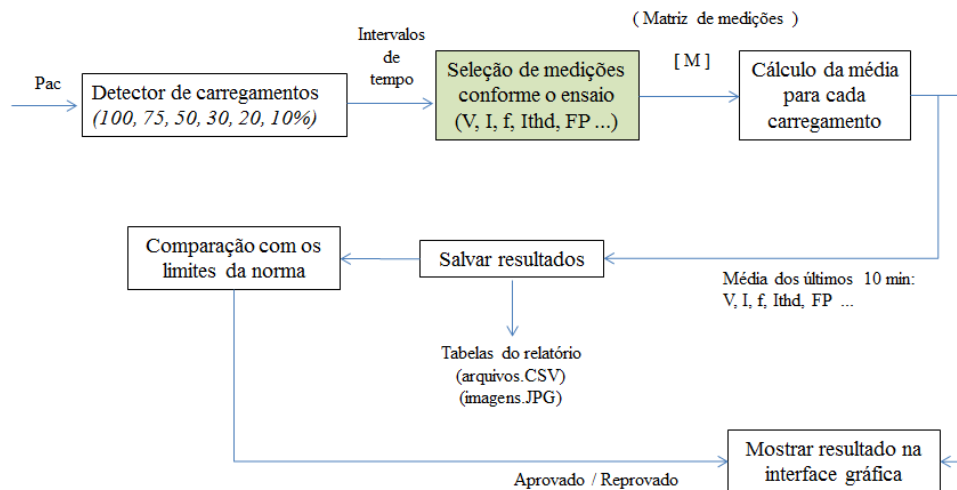


Figura 7 - Etapas do pós-processamento.

A seguir será apresentada a metodologia para a realização do ensaio com relação aos testes de harmônicos e fator de potência, denominados testes 03 e 04, cujas orientações estão descritas em ABNT<sup>2</sup> (2013). Os resultados destes testes são comparados aos limites máximos definidos em ABNT<sup>1</sup> (2013). A Fig. 8 mostra a parte do ensaio considerada; para estes testes em específico, as chaves do painel a serem ligadas estão mostradas na Tab. 3.

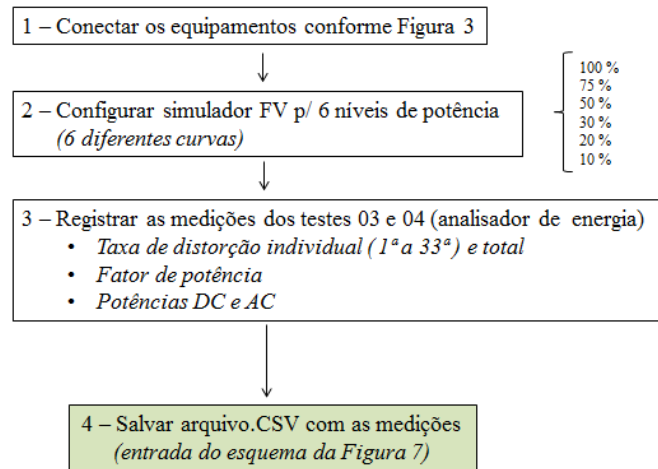


Figura 8 - Etapas do ensaio – Testes de harmônicos e fator de potência.

### 3. RESULTADOS

Nos parágrafos a seguir serão apresentados os resultados do ensaio para os dois testes citados anteriormente, que em seu conjunto demandariam um tratamento de medidas bastante árduo e susceptível a erros caso fossem feitos manualmente de modo repetitivo. Os testes se referem à verificação se o inversor em ensaio fica dentro dos limites aceitáveis com relação à distorção harmônica de corrente e ao fator de potência.

O inversor submetido ao ensaio é monofásico, com potência nominal de 4600 W e tensão nominal de 220 V.

A Fig. 9 mostra os resultados do teste na interface gráfica desenvolvida, referente aos ensaios 03 e 04, harmônicos de corrente e fator de potência.

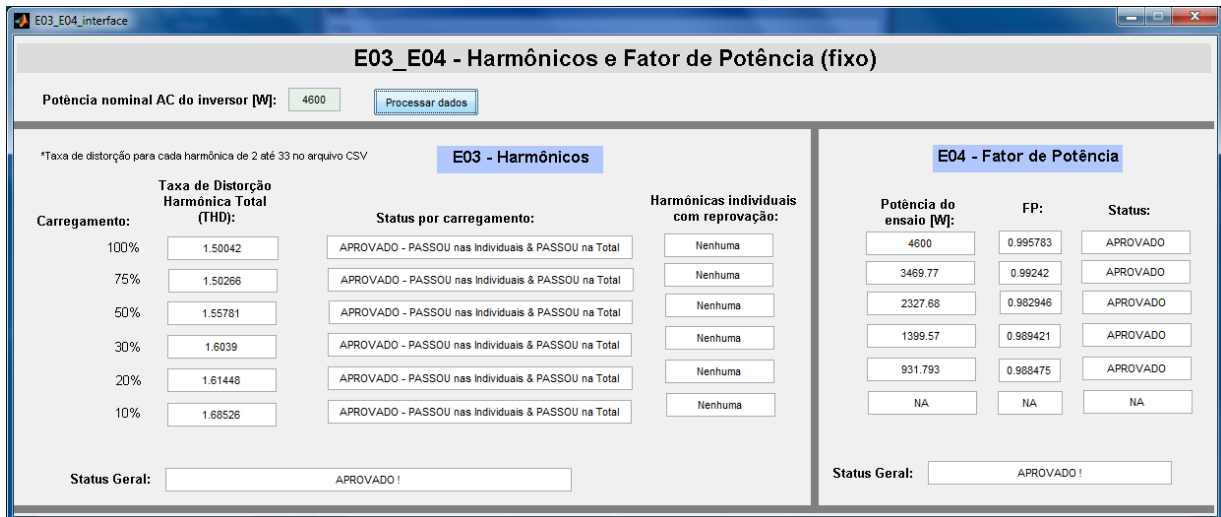


Figura 9 - Interface gráfica com os resultados do teste.

Eventuais espúrios podem ser detectados mediante a observação da potência ao longo do tempo, que se dá por meio da inspeção da Fig. 10. Este procedimento confere maior confiabilidade ao teste, visto que comportamentos inesperados podem ser detectados e, se necessário, o teste deverá ser refeito. Neste caso, observou-se normalidade devido à ausência de espúrios.

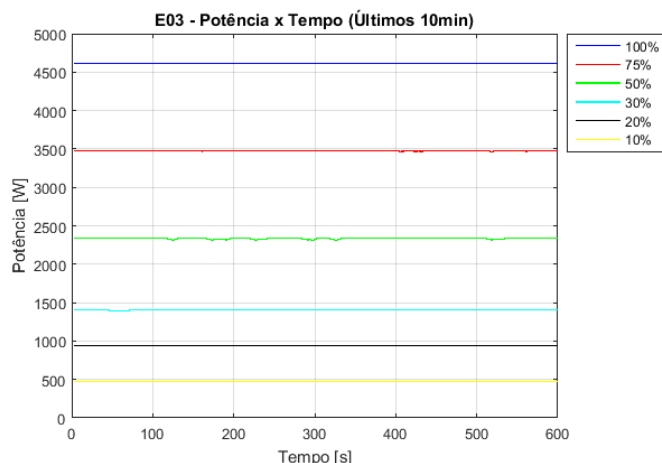


Figura 10 - Potência no intervalo de medição.

A Tab. 5 mostra os resultados para o ensaio de fator de potência. O inversor foi considerado em conformidade para os carregamentos para os quais o teste é requisitado.

Tabela 5 - Resultados – Fator de potência.

CARREGAMENTO [%]	POTÊNCIA DE ENSAIO [W]	FATOR DE POTÊNCIA	CONFORMIDADE
100	4600,00	0,995783	✓
75	3469,77	0,992420	✓
50	2327,68	0,982946	✓
30	1399,57	0,989421	✓
20	931,79	0,988475	✓

Os resultados referentes às taxas de distorção para cada harmônica da corrente estão mostrados na Tab. 6.

Tabela 6 - Resultados – Distorção harmônica da corrente.

ENSAIO A 100 % DA POTÊNCIA NOMINAL					
P(W):	4600	Ithd(%):	1,50	---	---
Ímpares			Pares		
Nº	Critério	Valor(%)	Nº	Critério	Valor(%)
3	< 4,0%	0,49	2	< 1,0%	0,50
5		0,85	4		0,15
7		0,47	6		0,07
9		0,21	8		0,05
11	< 2,0%	0,53	10	< 0,5%	0,06
13		0,08	12		0,05
15		0,18	14		0,05
17	< 1,5%	0,21	16		0,05
19		0,39	18		0,05
21		0,12	20		0,05
23		0,20	22		0,05
25	< 0,6 %	0,03	24		0,05
27		0,14	26		0,05
29		0,13	28		0,05
31		0,20	30	0,05	
33		0,10	32	0,05	

A Fig. 11 mostra a taxa de distorção harmônica total da corrente (TDH) no intervalo de aquisição usando-se o analisador de energia, a média das medidas para cada carregamento foi tomado como resultado para aprovação.

O *software* leu os arquivos de saída do analisador de energia, detectou os carregamentos, selecionou o intervalo de tempo mostrado na Fig. 11 por meio do procedimento mostrado na Fig. 7.



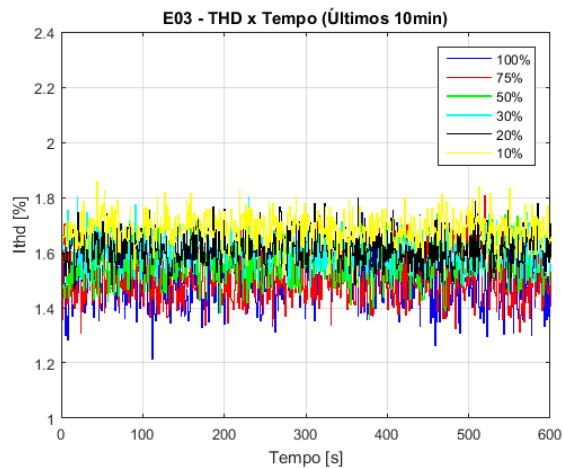


Figura 11 – Taxa de distorção harmônica total da corrente no intervalo de medição.

A partir da Fig. 9 e da Fig. 11 é possível observar a melhora na qualidade de energia elétrica (valores mais baixos de distorção harmônica) quando o inversor opera com carregamentos mais próximos à sua potência nominal.

Tendo em vista os resultados obtidos, o inversor ensaiado foi considerado em conformidade com as exigências da norma com relação à distorção harmônica da corrente injetada na rede elétrica.

#### 4. CONCLUSÃO

Uma forma de automatizar parte dos ensaios de inversores conectados à rede foi apresentada mediante pós-processamento. A utilização de um esquema de chaveamento por meio de um painel elétrico permitiu agilizar o processo de seleção de equipamentos necessária na troca de um teste para outro.

Tendo em vista os resultados obtidos, pôde-se observar a eficácia da ideia proposta no artigo, visto que os dados medidos não precisam ser organizados manualmente para a escrita do relatório de ensaio. Acredita-se que o esquema de reconfiguração das conexões por meio do painel elétrico em conjunto com o software de pós-processamento de medições constitua uma forma adequada de conduzir ensaios completos em sequência. A ideia proposta foi verificada para os testes de harmônicos e fator de potência, abordando importantes aspectos com relação à qualidade de energia elétrica em inversores fotovoltaicos conectados a redes de distribuição.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem à Fundação Luiz Englert pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT<sup>1</sup>, 2013, NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição.
- ABNT<sup>2</sup>, 2013, NBR 16150 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da Interface de Conexão com a Rede Elétrica de Distribuição – Procedimento de Ensaio de Conformidade.
- ABNT<sup>3</sup>, 2012, NBR IEC 62116 - Procedimento de Ensaio de Anti-ilhamento para Inversores de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.
- IEC<sup>1</sup>, 2008, IEC 61000-3-3 - Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-3: Limits – Limitation of Voltage Changes, Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-Voltage Supply Systems, for Equipment with Rated Current  $\leq 16$  A per Phase and not Subject to Conditional Connection.
- IEC<sup>2</sup>, 2010, IEC 61000-3-5 - Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-5: Limits – Limitation of Voltage Changes, Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater than 75 A.
- IEC<sup>3</sup>, 2000, IEC 61000-3-11 - Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-11: Limits – Limitation of Voltage Changes, Voltage Fluctuations and Flicker in Public Low-Voltage Supply Systems – Equipment with Rated Current  $\leq 75$  A and Subject to Conditional Connection.
- IEC<sup>4</sup>, 2008, IEC 61000-4-7 - Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected There to.
- IEC<sup>5</sup>, 2010, IEC 62109-1 - Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems – Part 1: General Requirements.

IEC<sup>6</sup>, 2011, IEC 62109-2 - Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems – Part 2: Particular Requirements for Inverters.

### **PROPOSAL FOR AUTOMATION OF TESTING OF PHOTOVOLTAIC INVERTERS CONNECTED TO DISTRIBUTION GRIDS**

**Abstract.** *This article shows the adequacy of a test bench for performing tests of photovoltaic grid-tied inverters. An algorithm based on post-processing of measurements is presented as a way to automate part of the tests required by specific standards regarding power quality issues. A connection scheme is proposed in order to speed up the reconfiguration of the equipment involved on each respective test. An example of the application of the proposed post-processing is presented with actual measurements on a single-phase inverter connected to the grid.*

**Keywords:** *Testing of Inverters, Photovoltaic Systems, Power Quality.*