

ENSAIOS DE INVERSORES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: RESULTADOS E ANÁLISE DE CONFORMIDADE

José Cesar de Souza Almeida Neto – cesar.almeida.eng@gmail.com

André Mocelin – mocelin@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. No Brasil, a necessidade crescente por sistemas de geração solar fotovoltaica conectados à rede de distribuição levou ao desenvolvimento de normas brasileiras para a conformidade de inversores. Assim, de forma a atender à população em geral, foi publicada a Portaria 357, de 01 de agosto de 2014, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), que inclui inversores para conexão à rede de potência nominal até 10 kW no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Por possuir os equipamentos necessários para a realização dos ensaios de conformidade com a portaria 357, o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo passou então a ser o primeiro laboratório acreditado pelo INMETRO para a realização desses ensaios. Este trabalho tem como objetivo resumir as experiências de aplicação das normas brasileiras no ensaio de inversores para o PBE no LSF, sendo apresentados os resultados obtidos nos ensaios de 15 inversores ao longo de três anos de operação da bancada de ensaio para sistemas conectados à rede, e a descrição das não conformidades encontradas. A partir desses ensaios conclui-se que, embora as normas brasileiras exijam rigor em seus requisitos, existem inversores capazes de atender aos requisitos normativos brasileiros, assim como existem inversores que necessitam de implementações nos respectivos firmwares de controle e sistemas de comunicação para conseguirem atender a todos os requisitos.

Palavras-chave: Energia Solar, Ensaio de Inversores, Normas Brasileiras

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário brasileiro, novas tecnologias para geração de energia são avaliadas e desenvolvidas, na tentativa de suprir a demanda energética do país e diminuir os custos da geração. Entre as alternativas existentes para solução deste problema está a geração distribuída, com as unidades geradoras instaladas nos pontos de consumo do sistema de distribuição de energia. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos ganham espaço e começam a ser difundidos, criando uma necessidade da população por equipamentos para instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em residências, centros comerciais e industriais.

Para atender à demanda da sociedade por equipamentos com qualidade, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, INMETRO, estabeleceu, ao longo dos anos, os critérios para testes e padrões de qualidade de diversos equipamentos para desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), como: módulos fotovoltaicos, baterias, controladores de carga e inversores para SFI. Com a nova demanda criada pela geração distribuída, por sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR), o INMETRO estabeleceu os critérios para avaliação de conformidade de inversores para SFCR, com base nas normas da ABNT, e incluiu esses equipamentos no Programa Brasileiro de Etiquetagem, PBE.

Os testes necessários para avaliar a conformidade determinada pelo INMETRO para inversores conectados à rede demandam diversos equipamentos, como: simuladores de rede, cargas e simuladores de arranjos fotovoltaicos, que também são necessários para desenvolvimento de pesquisa pelos laboratórios que trabalham com a tecnologia fotovoltaica. Assim, por possuir todos os equipamentos para o desenvolvimento dos testes de inversores conectados à rede, o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, LSF, do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo foi acreditado pelo INMETRO para a realização dos ensaios de avaliação de conformidade de inversores para SFCR comercializados no país.

Com o incremento da competitividade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede e o crescente interesse da sociedade nos sistemas de micro e mini geração, regulamentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) pelas Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015, é imprescindível o estabelecimento de requisitos mínimos de qualidade e segurança para a interface de conexão do inversor c.c./c.a. com a rede elétrica de distribuição.

2. ENSAIOS PARA INVERSORES CONECTADOS À REDE

Os ensaios de inversores para SFCR são ditados pelas normas ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, ABNT NBR IEC 62116 e pela portaria 357 de 01 de agosto de 2014. A Tab.1 resume os 17 ensaios e relaciona-os aos documentos de referência.

Tabela 1- Ensaios para inversores para SFCR e normas de referência.

NÚMERO	TESTE	NORMA DE REFERÊNCIA
1	Cintilação	ABNT NBR 16149 e NBR 16150
2	Injeção de componente continua	
3	Harmônicos e distorção de forma de onda	
4	Fator de potência	
5	Injeção/demanda de potência reativa	
6	Sobre/subtensão	
7	Sobre/subfrequência	
8	Controle da potência ativa em sobrefrequência	
9	Reconexão	
10	Religamento automático fora de fase	
11	Modulação de potência ativa	
12	Modulação de potência reativa	
13	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	
14	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede	
15	Proteção contra inversão de polaridade	Portaria INMETRO nº 357
16	Sobrecarga	ABNT NBR IEC 62116
17	Anti-ilhamento	

3. INFRAESTRUTURA LABORATORIAL

O LSF dispõe de equipamentos adequados para ensaios em inversores monofásicos de potência nominal até 10 kW, sendo estes:

- Simulador de arranjos fotovoltaicos;
- Simulador de rede c.a.;
- Banco de cargas RLC;
- Analisador de energia.

Estes equipamentos são conectados entre si, em conjunto com o inversor a ser ensaiado, de forma a constituir a bancada de ensaios de inversores para SFCR do LSF. A Fig 1 mostra o esquema de ligação dos equipamentos da bancada.

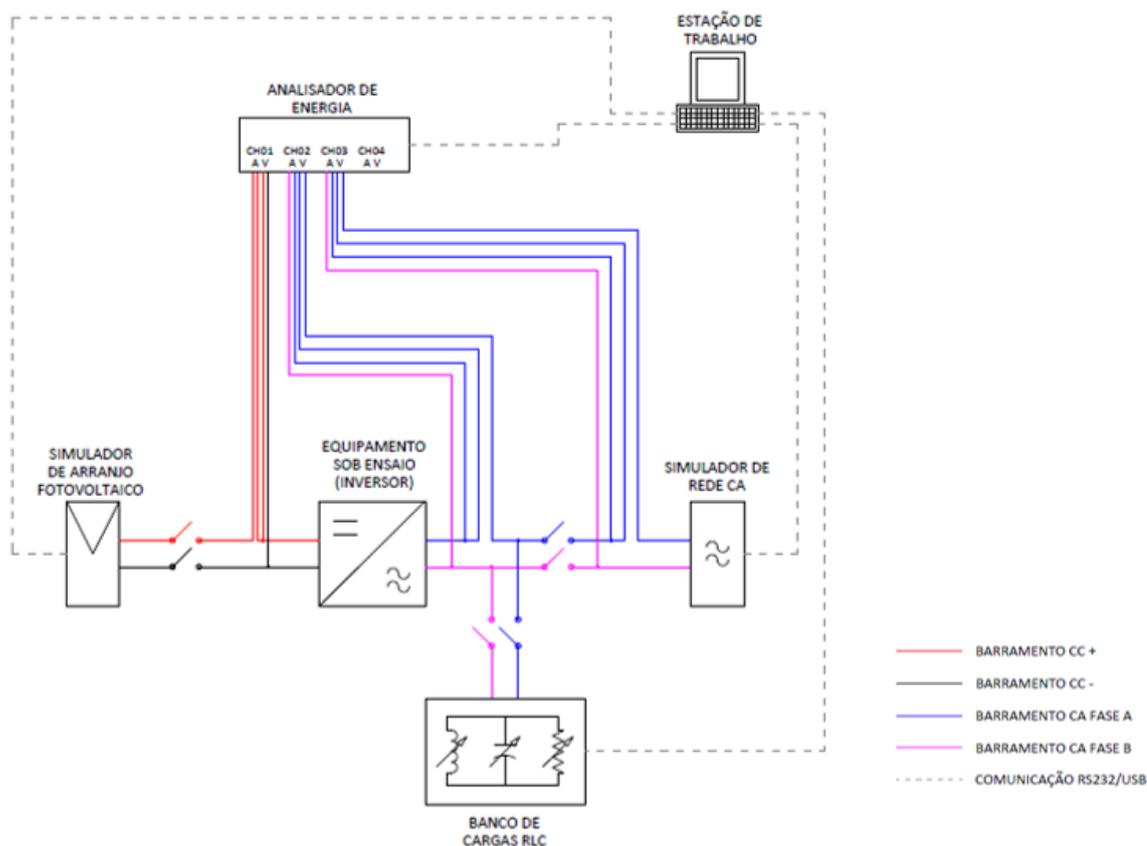


Figura 1- Esquema de ligação dos equipamentos da bancada para ensaios em inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Ao longo dos anos de 2014, 2015 e 2016 o LSF ensaiou e atuou no desenvolvimento de 14 modelos diferentes de inversores, segundo as instruções da portaria 357. A Tab. 2 faz um resumo das potências dos modelos submetidos a ensaios no LSF, de acordo com a data de entrega do relatório de conclusão dos ensaios aos respectivos fornecedores dos inversores, e relaciona os pontos de não conformidade encontrados.

Tabela 2- Resumo dos inversores ensaiados no LSF entre 2014 e 2016.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	DATA	EM CONFORMIDADE COM AS NORMAS?	NÃO CONFORME PARA OS ENSAIOS
1	1.500	09/14	Sim	-----
2	3.000	09/14	Sim	-----
3	4.600	09/14	Sim	-----
4	250	10/14	Não	6; 7; 13
5	2.000	02/15	Sim	-----
6	700	03/15	Não	3; 4; 8
7	1.500	03/15	Não	2; 3; 4; 8
8	2.000	03/15	Não	3; 4; 8
9	4.600	09/15	Não	5; 8; 17
10	5.000	11/15	Não	5; 8
11	4.600	12/15	Sim	-----
12	1.000	08/16	Sim	-----
13	1.500	12/16	Sim	-----
14	3.000	12/16	Sim	-----
15	5.000	12/16	Sim	-----

Analisando a Tab. 2, os ensaios em que os inversores apresentaram não conformidades com os requisitos da norma são: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13 e 17. Os próximos itens apresentam os resultados dos ensaios de inversores para estes quesitos e os comentários pertinentes a cada ensaio.

4.1 2º Ensaio – Injeção de componente c.c.

O ensaio de injeção de componente contínua consiste em variar o nível de potência de saída do inversor e verificar se o valor da componente c.c. é inferior 0,5 % em relação à corrente fundamental do inversor; caso o valor encontrado seja superior a 0,5 % o inversor deve cessar a injeção de corrente em até 1 minuto. A Tab. 3 apresenta os resultados obtidos para os equipamentos ensaiados no LSF.

Tabela 3-Resultados para ensaio de injeção de componente contínua.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	% DE COMPONENTE c.c.		
		100 % Pnom	66 % Pnom	33 % Pnom
1	1.500	0,20	0,20	0,25
2	3.000	0,04	0,05	0,06
3	4.600	0,04	0,05	0,06
4	250	0,07	0,07	0,04
5	2.000	0,16	0,16	0,15
6	700	0,42	0,45	0,39
7*	1.500	0,64	0,65	0,64
8	2.000	0,25	0,36	0,38
9**	4.600	0,00	0,00	0,00
10	5.000	0,06	0,10	0,12
11	4.600	0,00	0,01	0,01
12	1.000	0,14	0,19	0,35
13	1.500	0,35	0,26	0,37
14	3.000	0,07	0,25	0,24
15	5.000	0,08	0,14	0,19

* Este inversor ultrapassou os limites de injeção de componente c.c. e não se desconectou da rede elétrica.
 ** Este inversor apresenta transformador na saída de conexão com a rede elétrica e, portanto, o parâmetro de corrente c.c. não foi avaliado.

A Tab. 3 mostra que apenas um dos equipamentos ensaiados pelo laboratório não esteve em conformidade com os valores da norma. Entretanto, os valores obtidos para todos os equipamentos possuem ordem de grandeza próxima ao limite estabelecido.

4.2 3º Ensaio – Harmônicos e distorção de forma de onda

O ensaio de harmônicos e distorção de forma de onda demanda ao inversor um valor de distorção harmônica total de corrente (DHT₁) inferior a 5 %, em relação a componente fundamental de corrente, na condição de 100 % de carregamento do inversor; o ensaio também demanda valores limites para cada harmônico individual, conforme a descrito pela norma ABNT NBR 16149. A Tab. 4 resume os valores obtidos para a DHT₁ em todos os inversores ensaiados no LSF, os dados de harmônicas individuais medidos foram suprimidos da tabela.

Tabela 4- Resumo dos resultados para ensaios de DHT₁ realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE CORRENTE (%)					
		100 % Pnom	75 % Pnom	50 % Pnom	30 % Pnom	20 % Pnom	10 % Pnom
1	1.500	1,60	1,84	2,56	5,51	9,92	20,24
2	3.000	1,33	1,58	2,14	5,03	8,41	19,18
3	4.600	1,33	1,52	1,93	4,13	7,43	15,54
4	250	2,50	2,67	3,16	4,48	5,34	8,33
5	2.000	3,85	4,57	5,07	5,60	7,96	17,35
6	700	5,11	5,88	7,20	9,11	10,31	11,01
7	1.500	6,54	6,96	8,23	9,85	11,29	13,34
8	2.000	6,43	6,50	7,15	8,72	10,02	12,10
9	4.600	4,05	4,23	5,44	8,44	9,93	11,08
10	5.000	2,89	3,21	4,06	5,34	6,46	7,40
11	4.600	1,19	1,40	1,86	3,33	5,20	10,16
12	1.000	3,01	4,05	5,30	8,46	12,58	21,00
13	1.500	1,77	1,77	2,22	5,28	8,64	9,27
14	3.000	1,67	1,94	2,82	4,06	5,71	9,55
15	5.000	2,80	2,89	3,64	5,88	8,43	18,59

A Tab. 4 mostra em vermelho os inversores que não apresentaram conformidade com os requerimentos da norma. Os valores em laranja mostram os valores acima dos níveis destacados pela norma, mas que não são objeto de avaliação de conformidade. Assim todos os inversores que estavam em conformidade com os parâmetros da norma para a condição de 100 % da potência nominal também estavam de acordo com os parâmetros para a condição de 75 % da potência nominal. A análise dos resultados para 50 % da potência nominal mostra que a maior parte dos inversores testados é capaz de atingir o valor de DHT_1 necessário para estar em conformidade com a norma, porém apresentam algum valor de distorção harmônica individual de corrente (DHI_i) não conforme com os valores de referência.

4.3 4º Ensaio – Fator de potência

A avaliação de fator de potência dos inversores para SFCR requer a operação em níveis de carregamento acima de 20 %, com fator de potência entre 0,98 indutivo e 0,98 capacitivo com tolerância de $\pm 0,025$ nos valores obtidos.

Tabela 5- Resumo dos resultados para ensaios de fator de potência realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	FATOR DE POTÊNCIA					
		100 % Pnom	75 % Pnom	50 % Pnom	30 % Pnom	20 % Pnom	10 % Pnom
1	1.500	0,9915	0,9846	0,9871	0,9841	0,9547	0,6816
2	3.000	0,9959	0,9924	0,9862	0,9924	0,9989	0,8864
3	4.600	0,9964	0,9932	0,9847	0,9895	0,9942	0,9561
4	250	0,9968	0,9950	0,9911	0,9771	0,9506	0,8188
5	2.000	0,9982	0,9974	0,9951	0,9870	0,9747	0,9303
6	700	0,9858	0,9721	0,9332	0,8357	0,7001	0,4592
7	1.500	0,9948	0,9908	0,9787	0,9453	0,8889	0,7116
8	2.000	0,9996	0,9978	0,9918	0,9726	0,9384	0,8066
9	4.600	0,9967	0,9970	0,9976	0,9989	0,9997	0,9935
10	5.000	0,9997	0,9985	0,9948	0,9973	0,9990	0,9046
11	4.600	0,9998	1,0000	1,0000	0,9976	0,9978	0,9785
12	1.000	0,9876	0,9864	0,9840	0,9785	0,9727	0,9475
13	1.500	0,9980	0,9953	1,0000	0,9912	0,9985	0,8410
14	3.000	1,0000	0,9997	0,9976	1,0000	0,9926	0,9096
15	5.000	0,9999	0,9998	0,9973	0,9992	0,9952	0,9171

Conforme descrito por Almeida Neto (2017), foi adotado o valor de 0,975 como valor mínimo para a conformidade. A Tab. 5 mostra os valores obtidos para os ensaios de fator de potência realizados no LSF, os valores em vermelho apresentam não conformidade com os valores de norma, e os valores em laranja estão abaixo dos índices destacados pela norma, mas não são objeto de avaliação de conformidade. Desta forma a maioria dos inversores ensaiados foi capaz de atender aos requisitos das normas. Alguns equipamentos operaram com FP abaixo de 0,98, porém dentro da tolerância de 0,975.

4.4 6º Ensaio – Sobre/ sub tensão

O ensaio de avaliação do comportamento do inversor sobre condições de sobre/subtensão demanda ao inversor a desconexão do sistema elétrico em situações onde a tensão da rede elétrica é superior a 110 %, com tolerância de + 2%, ou inferior a 80 %, com tolerância de $\pm 2\%$, do seu valor nominal. Em cada uma destas situações a norma ainda requer ao inversor um tempo limite para a desconexão de 0,4 e 0,2 segundos, respectivamente. A Tab. 6 resume os resultados obtidos para os inversores ensaiados no LSF.

Tabela 6 – Resumo dos resultados para ensaios de sobre/subtensão realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	SOBRETENSÃO		SUBTENSÃO	
		Valor de desconexão (% Vnom)	Tempo de desconexão (ms)	Valor de desconexão (% Vnom)	Tempo de desconexão (ms)
1	1.500	110	146	80	153
2	3.000	111	130	80	132
3	4.600	111	153	80	149
4	250	118	171	76	59
5	2.000	110	165	80	62
6	700	110	118	80	270
7	1.500	110	135	80	289
8	2.000	110	139	80	289
9	4.600	110	57	80	65

10	5.000	110	44	80	124
11	4.600	110	109	79	136
12	1.000	110	34	81	2
13	1.500	111	116	80	124
14	3.000	111	123	80	115
15	5.000	110	44	80	124

Os resultados obtidos para os ensaios em condições anormais de tensão mostraram que a maioria dos inversores para SFCCR ensaiados no laboratório tem capacidade para atender aos requisitos das normas brasileiras. Porém, cabe ressaltar que durante os testes de desenvolvimento alguns dos inversores tiveram seus níveis de detecção ajustados através dos seus painéis frontais, a fim de atenderem aos limites das normas brasileiras.

4.5 7º Ensaio – Sobre/subfrequência

De forma análoga ao ensaio de sobre/subtensão, o ensaio de sobre/subfrequência requer do inversor a desconexão do sistema elétrico caso a frequência da rede elétrica ultrapasse o valor de 62,0 Hz, ou se reduza a um valor inferior a 57,5 Hz. Em ambos os casos o tempo limite para a desconexão é de 0,2 segundos. A Tab. 7 resume os resultados obtidos para os inversores ensaiados no LSF.

Durante uma situação de sobrefrequência da rede, onde o valor da frequência esteja entre 60,5 Hz e 62,0 Hz, o inversor deve reduzir a injeção de potência ativa na rede elétrica conforme a Eq. 1.

$$\Delta P = [f_{rede} - (f_{nom} + 0,5)].R \quad (1)$$

onde:

ΔP é a variação da potência ativa injetada, expressa em porcentagem em relação à potência ativa injetada no momento em que a frequência excede 60,5 Hz (P_M);

f_{rede} é a frequência real da rede;

f_{nom} é a frequência nominal da rede;

R é a faixa de redução da potência injetada, expressa em porcentagem por Hertz, ajustada em - 40 %/Hz.

Tabela 7- Resumo dos resultados para ensaios de sobre/subfrequência realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	SOBREFREQUÊNCIA		SUBFREQUÊNCIA	
		Valor de desconexão (Hz)	Tempo de desconexão (ms)	Valor de desconexão (Hz)	Tempo de desconexão (ms)
1	1.500	62,0	66	57,5	65
2	3.000	62,0	118	57,5	115
3	4.600	62,0	155	57,5	126
4	250	60,5	4	57,5	4
5	2.000	62,1	138	57,5	14
6	700	62,1	109	57,5	126
7	1.500	62,1	92	57,5	124
8	2.000	62,1	125	57,5	123
9	4.600	62,0	86	57,5	86
10	5.000	62,1	130	57,5	111
11	4.600	62,0	33	57,5	41
12	1.000	62,0	52	57,5	35
13	1.500	62,0	25	57,5	31
14	3.000	62,0	26	57,5	27
15	5.000	62,0	33	57,4	41

Pelos resultados apresentados na Tab. 7, apenas um modelo de inversor não está de acordo com os limites estabelecidos pela norma. A Fig. 2 mostra os resultados das potências entregues para cada patamar de frequência. Para uma melhor interpretação dos resultados, a Fig. 3 mostra os valores de potência normalizados pela potência entregue pelo inversor na frequência de 60,5 Hz.

A análise da Fig. 3 revela que alguns dos modelos (inversores 6, 7 e 8), mesmo em conformidade com os valores de desconexão e respectivo tempo, não atendem aos requisitos de controle de potência ativa em sobrefrequência avaliados pelo 8º ensaio.

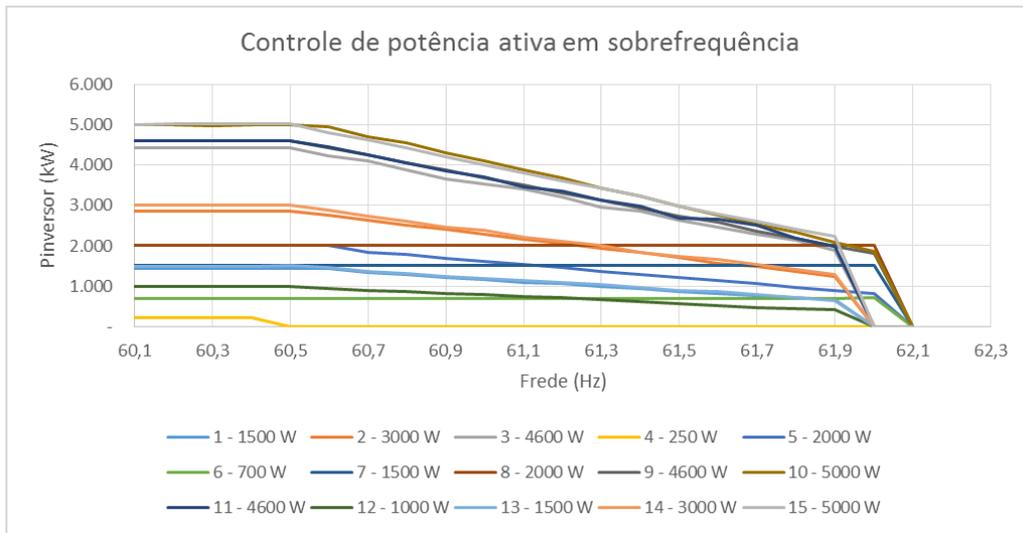


Figura 2- Resultados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF.

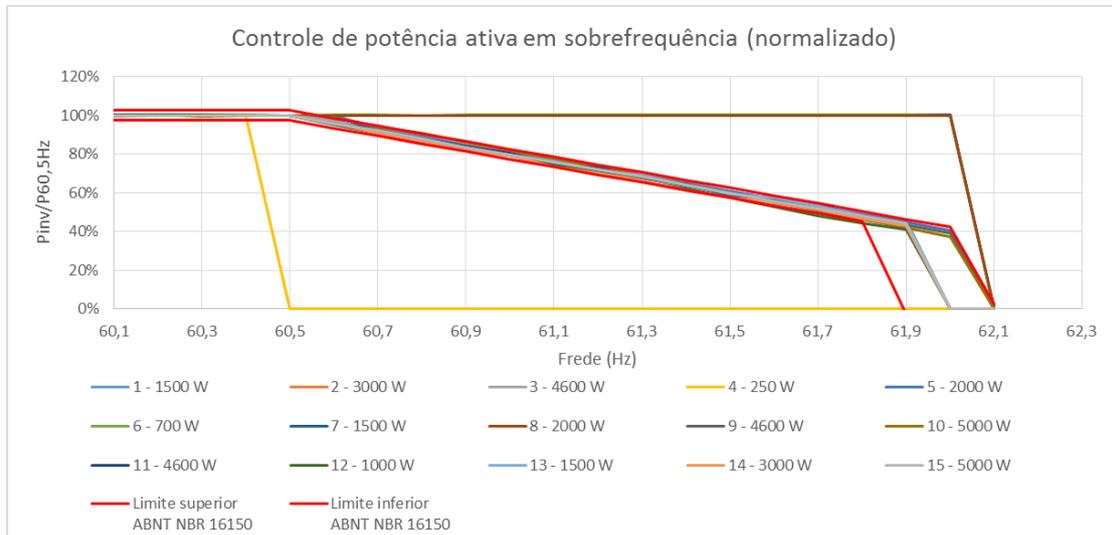


Figura 3- Resultados normalizados para as potências entregues em regime de sobrefrequência para os inversores testados no LSF.

4.6 8º Ensaio – Controle da potência ativa em sobrefrequência

Conforme descrito no item anterior, durante uma situação de sobrefrequência da rede elétrica, em que a frequência se mantenha entre valores de 60,5 Hz e 62,0 Hz, o inversor deve reduzir a potência ativa injetada na rede elétrica. O ensaio de controle de potência ativa, além de avaliar a redução da potência ativa, também avalia o aumento da injeção da potência quando do retorno da frequência da rede para o valor nominal. Segundo a norma ABNT NBR 16149, uma vez retomadas as condições normais de frequência, após 300 segundos ao inversor é permitido aumentar a injeção de potência ativa em uma taxa de 20 % de P_M por minuto. A Fig. 4 mostra os valores de controle de potência ativa em sobrefrequência, a Fig. 5 mostra os valores para avaliação do gradiente de injeção de potência, sendo em ambas as figuras os valores normalizados de forma similar à da Fig. 3.

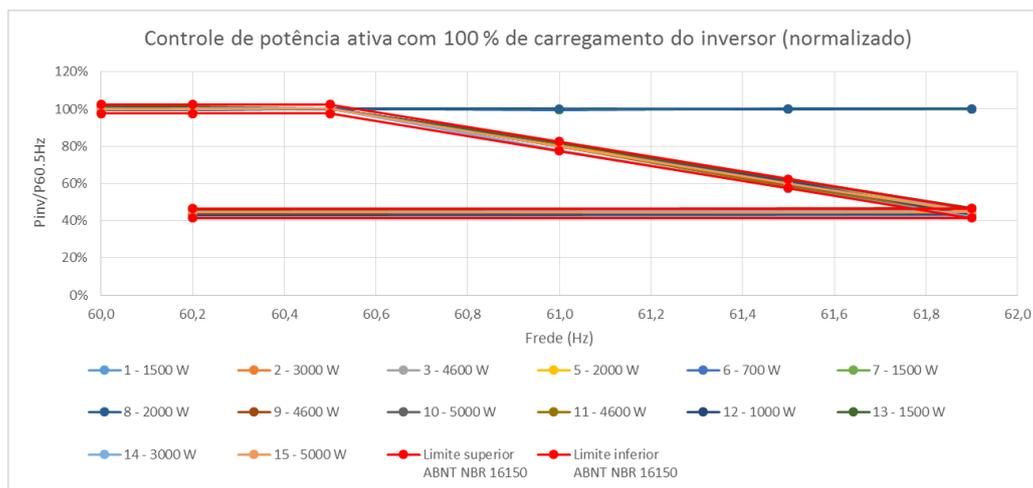


Figura 4- Primeira parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.

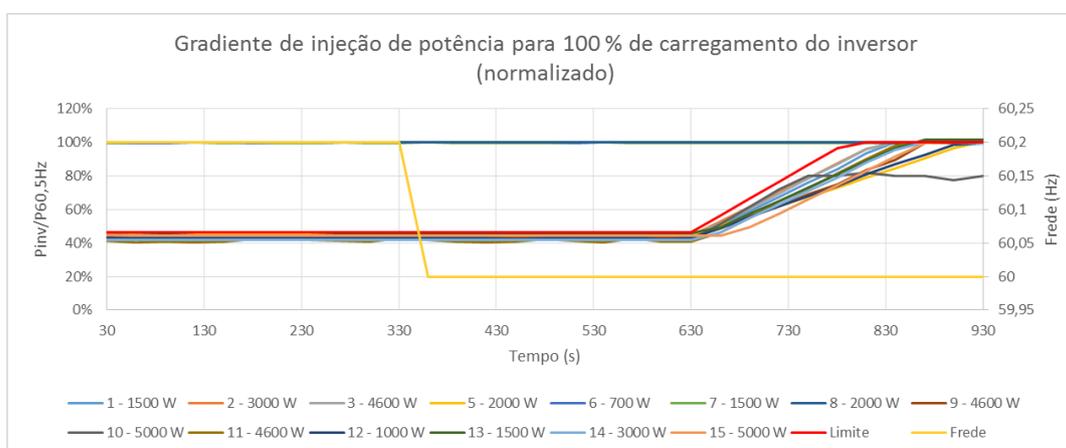


Figura 5- Segunda parte dos resultados normalizados dos ensaios de controle de potência ativa em 100 % de carregamento para os inversores testados no LSF.

As figuras normalizadas mostram os limites estabelecidos pelas normas brasileiras para as duas partes do ensaio. Desta forma, durante a primeira parte, os inversores que apresentaram uma injeção de potência acima ou abaixo das linhas limites não estavam em conformidade com os requisitos do ensaio. De forma similar, na segunda parte do ensaio, os inversores que apresentam um gradiente de injeção de potência que ultrapasse a linha limite ou possuam uma inclinação superior à da linha limite também não estão em conformidade com os requisitos da norma.

4.7 13º Ensaio – Desconexão do sistema fotovoltaico da rede

O ensaio de desconexão do sistema fotovoltaico da rede requer ao inversor fotovoltaico um sistema integrado de telecomunicação capaz de receber comandos remotos e assim ativar ou desativar a injeção de potência para a rede elétrica. A Tab. 8 mostra os valores obtidos para este ensaio.

Tabela 8- Resultados obtidos para ensaios de desconexão do sistema fotovoltaico da rede realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	POTÊNCIA ENTREGUE À REDE (W)	
		Antes do comando	Após o comando
1	1.500	1.500	0
2	3.000	3.000	0
3	4.600	4.600	0
4*	250	X	X
5	2.000	2.000	-9
6	700	703	-1
7	1.500	1.498	-1
8	2.000	2.020	0

9	4.600	4.598	-1
10	5.000	4.622	0
11	4.600	4.598	-1
12	1.000	1.000	-4
13	1.500	1.501	-1
14	3.000	3.002	-1
15	5.000	5.006	-1

* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

Os inversores ensaiados no LSF apresentaram a desconexão e reconexão por telecomando conforme as orientações das normas brasileiras, com exceção do inversor número quatro que não possuía nenhum tipo de meio de comunicação para envio de comandos externos. Cabe ressaltar que entre os demais inversores, a maioria não dispunha de *software* comercial para a realização do envio do comando de desconexão/reconexão e foi necessário requerer às equipes técnicas de cada equipamento o desenvolvimento de um *software* para realização deste ensaio. Durante a desconexão alguns inversores ainda apresentaram algum fluxo de potência, porém abaixo de 1 % da potência nominal do inversor e foram considerados em desconexão.

4.8 17º Ensaio – Anti-ilhamento

O ensaio para avaliação da proteção do inversor em relação a uma situação de ilhamento é orientado pelo texto da norma ABNT NBR/IEC 62116, e consiste em limitar o fluxo de potência que é entregue à rede por meio do consumo da potência por uma carga RLC local, instalada junto à saída c.a. do inversor. Com o fluxo de potência limitado ou nulo a rede elétrica é desconectada e o inversor deve cessar de injetar potência na rede. A ao todo são ensaios 31 pontos de entrega da potência pelo inversor à rede elétrica, Tab. 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os inversores ensaiados no LSF, com os respectivos tempos de desconexão para as três condições de equilíbrio do sistema, onde a potência entregue pelo inversor nas condições A, B e C é igual a 100%, 58% e 29 %, respectivamente.

Tabela 9- Resumo dos resultados para ensaios de anti-ilhamento realizados no LSF.

INVERSOR	POTÊNCIA (W)	TEMPO DE DESCONEXÃO (ms)		
		Condição A	Condição B	Condição C
1	1.500	258	232	153
2	3.000	152	185	179
3	4.600	144	136	83
4*	250	X	X	X
5	2.000	111	203	190
6	700	240	216	203
7	1.500	212	201	198
8**	2.000	276	200	192
9***	4.600	X	X	X
10**	5.000	218	219	X
11	4.600	123	123	141
12	1.000	81	54	75
13	1.500	285	276	252
14**	3.000	198	282	138
15**	5.000	123	171	198

* Não foi realizado o ensaio para este equipamento

** Não foi possível realizar o ensaio completo devido à oscilação de potência reativa dos inversores

*** O inversor operou em situação de ilhamento

Os resultados mostram que os tempos de desconexão dos equipamentos ensaiados são consideravelmente inferiores ao limite de dois segundos estabelecido pela norma. Isto se deve à falta de integração entre os textos das normas. Assim, para atender aos limites de desconexão por outros defeitos na rede, como variação de tensão e frequência, os inversores tendem a apresentar tempos de desconexão abaixo de 400 ms. Desta forma, o tempo de desconexão não foi um empecilho aos inversores ensaiados no LSF e o ensaio remeteu à avaliação do inversor cessar ou não o fornecimento de energia à rede.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados dos ensaios realizados para 15 diferentes inversores para SFCR. Os inversores foram testados no LSF com base nas normas brasileiras e suas referências. Foram destacados os resultados dos ensaios em que um ou mais inversores apresentaram não conformidade com os requisitos das normas.

A análise dos resultados revela que enquanto alguns inversores apresentaram não conformidade para ensaios específicos, estes não são a maioria e, desta forma, é possível aos fabricantes adequarem seus produtos de forma a atender aos requisitos normativos.

Um caso que merece destaque é a realização do 13º ensaio para inversores com potência inferior a 600 W. Em geral, este tipo de equipamento é desenvolvido para a instalação junto com o módulo fotovoltaico e deve ficar exposto ao tempo, sendo necessárias medidas de proteção contra material particulado e umidade. Desta forma, este tipo de equipamento, raramente possui algum tipo de entrada de comunicação que possa ser utilizada para envio e recebimento de comandos, sendo necessário que os fabricantes deste tipo de equipamento façam alterações de projeto a fim de cumprir com este requisito da norma.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 2012. Resolução normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012.
- Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 2015. Resolução normativa nº 687. 24 de Novembro de 2015.
- Almeida Neto, J. C. S., 2017. Avaliação de conformidade de inversores para micro e mini geração fotovoltaica: a implantação da NBR 16150 e NBR IEC 62116. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2012. ABNT NBR IEC 62116 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2013. ABNT NBR 16149 - Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2013. ABNT NBR 16150 - Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade.
- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, INMETRO, 2011. Portaria nº 004 de 04 de Janeiro de 2011.
- Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, INMETRO, 2014. Portaria nº 357 de 01 de Agosto de 2014.
- International Electrotechnical Commission, IEC, 2008. IEC 62116, Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures
- International Electrotechnical Commission, IEC, 2013. 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 ≤ 75 A and subject to conditional connection.
- International Electrotechnical Commission, IEC, 2013. 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 ≤ 16 A per phase and not subject to condition.
- International Electrotechnical Commission, IEC, 2013. IEC 61000-3-5, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A.

Os autores agradecem o apoio da FAPESP e da CAPES no desenvolvimento deste trabalho.

GRID-TIE PHOTOVOLTAIC SYSTEM INVERTER TEST: RESULTS AND CONFORMITY ANALYSIS

Abstract. *In Brazil, the increasing demand for grid-tie photovoltaic systems lead to the development of the Brazilian standards for inverter quality and evaluation. In order to meet the general population demand, the National Institute for Metrology, Quality and Technology (INMETRO) published the normative nº 357 01/08/2014 to include inverters up to 10 kW in the Brazilian Labeling Program (PBE). Having all the equipment needed for inverter conformity evaluation in accordance with the normative nº 357, the Laboratory of Photovoltaic Systems (LSF) of the Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo became the first INMETRO accredited laboratory to conduct inverter evaluations in Brazil. This work's main goal is to summarize the experience acquired with the application of the Brazilian standards for inverter testing in LSF. The results obtained for the tests with 15 different inverters during the first three years of operation of the inverter test bench are presented. Using the obtained data this work concludes that although the Brazilian standards have rigorous criteria, there are inverters capable of complying with the standards requirements, and there are inverters that need further software and hardware development in order to comply with all the requirements.*

Key words: *Solar Energy, Inverter Evaluation, Brazilian Standards*