

# QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E O FUNCIONAMENTO DE INVERSORES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

**Jair Urbanetz Junior** – urbanetz@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Eletrotécnica

**Ricardo Rütther** – ruther@mbox1.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, LABSOLAR e LabEEE

**Resumo.** Este artigo apresenta o resultado da análise realizada em diversos SFCR sob o foco da qualidade de energia no ponto de conexão, verificando a influência da energia fotogerada sobre a qualidade da energia já existente na rede elétrica, bem como a influência da qualidade de energia no funcionamento dos inversores. Observou-se melhora quanto à qualidade da energia no ponto onde operam SFCR, e também se verificou casos onde a baixa qualidade de energia inviabilizou o funcionamento dos SFCR ou prejudicou seu desempenho, necessitando outras ações para viabilizar o funcionamento do SFCR.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Qualidade de Energia, Inversores

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) são uma tendência mundial de aplicação da tecnologia fotovoltaica, seu crescimento anual tem sido superior a 40% nos últimos anos, inclusive em 2004 superando os Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFVI) (REN21, 2009). No Brasil essa tendência ainda não se manifestou, os SFVI são maioria, porém é esperado para os próximos anos que os SFCR passem a ocupar posição de destaque também no Brasil. Uma vez instalado um SFCR espera-se obter a maior geração de energia possível, isso está diretamente relacionado, entre outros fatores, ao tempo em que o SFCR opera, com o mínimo de interrupções.

Existe uma interação entre o funcionamento de inversores de SFCR e a qualidade da energia elétrica no ponto de conexão. Os inversores ao entregarem energia à rede injetam uma forma de onda de corrente que teoricamente deveria ser puramente senoidal, mas que dependendo do inversor e do percentual de potência que está sendo processada em relação à sua potência nominal, esta corrente, apresenta certo grau de distorção. Por outro lado a rede pública de baixa tensão deve possuir um grau de qualidade na energia elétrica que permita o funcionamento dos inversores de SFCR. Estes inversores monitoram a rede elétrica de forma a somente fornecer energia se a rede estiver presente e com suas características padrão.

Devido a pouca quantidade de SFCR no Brasil e por grande parte desses sistemas estarem instalados em Universidades e Centros de Pesquisa, poucos problemas com a qualidade de energia são relatados. Nesses ambientes, diferente do ambiente industrial, existe menor tendência da energia elétrica possuir elevado conteúdo harmônico.

Entre os projetos de SFCR que o Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) vem desenvolvendo e implantando ao longo dos últimos treze anos, um sistema de 14,69kWp instalado em 2008 em uma indústria metalúrgica de São Bernardo do Campo - SP, apresentou problemas na conexão do sistema devido à baixa qualidade da energia elétrica da rede. Outro sistema com 2,12kWp, instalado em 2009 no Aeroporto Internacional Hercílio Luz em Florianópolis – SC, nos dias de calor intenso, também apresentou falhas na conexão. Uma investigação mais profunda da inter-relação entre a qualidade da energia elétrica e o desempenho de inversores de SFCR foi realizada.

Conhecer a qualidade da energia no ponto onde se deseja fazer a conexão de um sistema fotovoltaico passa a ser mais um quesito a ser considerado durante o anteprojeto de um SFCR, para garantir que os mesmos operem adequadamente, com o mínimo de interrupções e conseqüentemente máximo desempenho.

### 1.1 Inversores utilizados em SFCR

Os inversores para SFCR são divididos em dois grupos: os comutados pela rede e os auto comutados. Os inversores comutados pela rede são normalmente usados para altas potências, enquanto os auto comutados são normalmente usados em potências menores (HESKES e ENSLIM, 2003). A maioria dos inversores auto comutados geram o formato da corrente de saída baseado em uma tabela programada em um processador interno, e a sincronização com a rede elétrica é obtida com o auxílio de um circuito PLL (*phase locked loop*). Alguns inversores combinam sincronização e referência a partir da tensão da rede, porém se a tensão da rede é poluída, a referência também o é, prejudicando a corrente gerada (HESKES e ENSLIM, 2003).

Esses inversores são concebidos com diferentes circuitos de conversão de energia e opções de transformadores. Eles podem ser categorizados com base no número de estágios de processamento de energia; localização dos

capacitores de desacoplamento; transformador de baixa ou de alta frequência ou ausência do mesmo; e tipo de interface com a rede elétrica (KJAER et al., 2005). Os estágios de processamento de energia, único ou múltiplos estágios, são responsáveis por adaptar o nível de tensão CC do painel fotovoltaico e fazer a busca do ponto de máxima potência. Os capacitores de desacoplamento encontram-se em paralelo com o painel fotovoltaico e também no barramento CC dos circuitos com múltiplos estágios. Os transformadores são responsáveis pela adaptação do nível de tensão e pela isolação galvânica entre o arranjo fotovoltaico e a rede elétrica, permitindo o aterramento do painel fotovoltaico quando necessário. Quanto a interface com a rede elétrica está relacionado ao modo de operação do inversor, se operando no modo fonte de corrente (CSI – *current source inverter*) ou modo fonte de tensão (VSI – *voltage source inverter*), além dos filtros de saída (KJAER et al., 2005). A estratégia de modulação PWM (*pulse width modulation*) normalmente utilizada no estágio de saída dos inversores requer a presença de filtros de saída formados por indutores e capacitores, com o intuito de reduzir o conteúdo harmônico da corrente injetada na rede elétrica (MARTINS e BARBI, 2005). As Figuras 1 a 4 apresentam algumas variações dessas topologias.

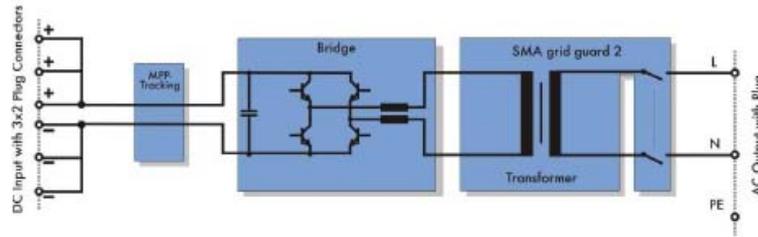


Figura 1 – Inversor com transformador de baixa frequência.  
Fonte: (SMA, 2008)

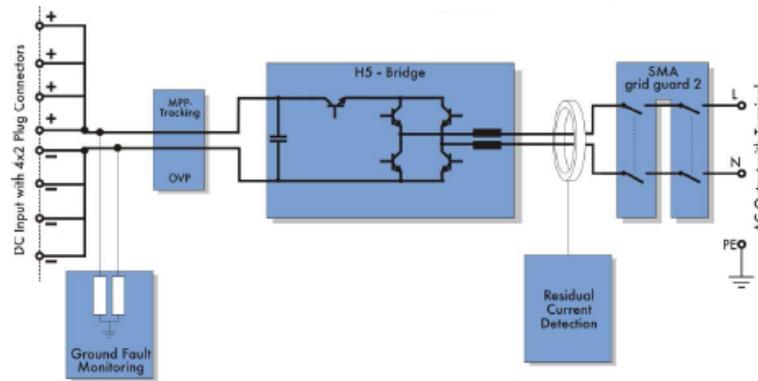


Figura 2 – Inversor sem transformador.  
Fonte: (SMA, 2008)

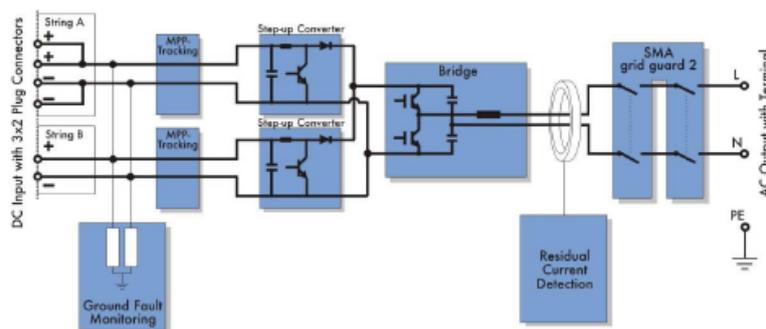


Figura 3 – Inversor sem transformador e multi-string.  
Fonte: (SMA, 2008)

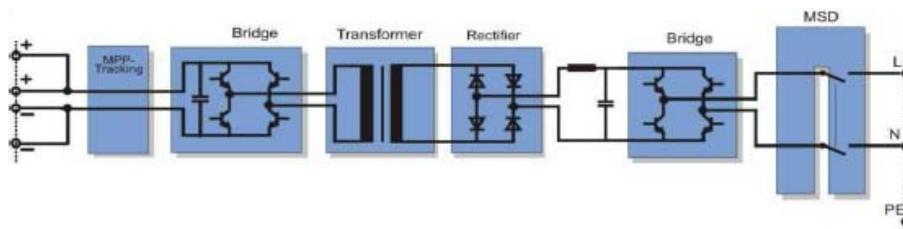


Figura 4 – Inversor com transformador de alta frequência.  
Fonte: (SMA, 2008)

Os inversores comercialmente disponíveis são formados por variações dessas topologias, porém a existência ou não do transformador de baixa frequência é uma característica que tem impacto importante no peso, volume e rendimento do inversor. Inversores sem transformador chegam a ter cerca de 2% (absoluto) a mais de eficiência se comparados aos inversores com transformador (HAEBERLIN, 2001). Outros aspectos que interferem no rendimento são o percentual de potência aplicado na entrada em relação a potência nominal do inversor, e também o nível de tensão CC disponibilizado pelo arranjo fotovoltaico na entrada do inversor (DRIESSE et al., 2008) (BAUMGARTNER et al., 2007) (HAEBERLIN et al., 2006). O nível de tensão CC entregue ao inversor também está fortemente relacionado com a faixa de operação do circuito de busca do ponto de máxima potência, o que interfere no desempenho global do SFCR (HAEBERLIN, 2005).

A estratégia adotada para prover a característica de anti-ilhamento do inversor também deve ser observada, pois ela pode interferir na qualidade da corrente fotogerada.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Considerações gerais

O presente trabalho trata de uma pesquisa de natureza aplicada, teórico empírica, com finalidade de explorar e explicar o fenômeno da interação entre a qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores de SFCR (JUNG, 2004) (RAUEN, 2002). Parte do desenvolvimento da pesquisa ocorreu no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR - UFSC) e parte em campo fazendo uso de SFCRs em operação, sendo grande parte em Florianópolis – SC.

Quanto à técnica de coleta de dados para a análise da interação entre os SFCRs e os parâmetros de qualidade de energia elétrica (Distorção Harmônica Total da Tensão - THD<sub>v</sub>, Distorção Harmônica Total da Corrente - THD<sub>i</sub>, tensão e frequência) foram realizadas medições no ponto de conexão com a rede, sendo essas medições com os sistemas fotovoltaicos gerando energia e desligados, além de ensaios em laboratório.

Foi também analisado o funcionamento de inversores conectados a sistemas onde a rede elétrica é produzida a partir de um gerador diesel ou gasolina.

Estas medições foram realizadas com um analisador de rede da marca FLUKE modelo 434 e com um osciloscópio digital TEKTRONIX modelo TPS2012 dotado do software TPS2PWR1 específico para análise de medidas de potência. Os módulos FV disponíveis para a realização dos ensaios são das seguintes tecnologias:

- silício policristalino;
- silício amorfo depositado em vidro;
- silício amorfo depositado em material flexível;
- silício microcristalino.

Quanto aos inversores para SFCR disponíveis para o desenvolvimento dos ensaios são:

- WÜRTH 650W;
- WÜRTH Solar Star 1200W;
- WÜRTH Solar Star 1500W;
- SMA SB1100;
- SMA SB2500;
- SMA SB4000US;
- SMA SMC6000.

Entre os inversores citados, foi dada atenção especial ao modelo SB2500 da SMA no estudo da interação entre a qualidade da energia elétrica e o funcionamento do inversor pelas seguintes razões:

- trata-se de um modelo atual;
- possui diversos recursos para monitoramento;
- admite alteração na configuração de diversos de seus parâmetros;
- está em uma faixa de potência com grande potencial de aplicação no Brasil;
- facilidade de acesso a SFCR que se utilizam desse modelo (04 na UFSC – Florianópolis - SC; 01 no Aeroporto – Florianópolis - SC; 01 na Indústria Zeppini – São Bernardo do Campo – SP);
- um dos inversores instalados na UFSC encontra-se no LABSOLAR, o que permite a realização de variados ensaios;
- o inversor instalado na Zeppini, estudo de caso, é um forte exemplo da interação entre a qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores.

Fabricantes de inversores para SFCR destacam como parâmetros da rede elétrica necessários ao seu funcionamento: faixa de tensão CA, frequência e impedância. A metodologia apresentada vincula ainda o parâmetro THD, mais especificamente o parâmetro THD<sub>v</sub>, verificando em relação aos valores estabelecidos por norma o quanto o inversor interfere no conteúdo harmônico da energia no ponto de conexão, bem como identificando limites relacionados ao conteúdo harmônico já existente na instalação elétrica que possam impedir a entrada em operação dos inversores.

## 2.2 Ensaios realizados em laboratório

Para a realização de ensaios no LABSOLAR, foi utilizado o painel fotovoltaico de 2kWp existente no local, inversores WÜRTH de 650W e SMA modelo SB2500, além de uma fonte de geração de corrente alternada (CA) ou de corrente contínua (CC) da marca SUPPLIER. Essa fonte, quando operando no modo CA, permite alterar os parâmetros que compõem a energia fornecida pela mesma, como tensão, frequência, percentual de cada componente harmônica (até a quinquagésima primeira) para simular uma rede elétrica com diferentes conteúdos harmônicos. Quando operando no modo CC, ela pode simular um painel fotovoltaico com tensão CC de até 600V e corrente controlada. Os ensaios são focados no ponto de conexão do sistema fotovoltaico com a rede elétrica, similar ao descrito em (LIMSAKUL et al., 2008).

Fazendo uso do osciloscópio TEKTRONIX TPS2012, foram capturadas formas de onda de tensão e corrente no ponto de conexão, e com o uso do *software* TPS2TWR1, específico para análise dos parâmetros de potência, observou-se as características quanto à qualidade da energia elétrica baseado na observação das formas de onda e no espectro harmônico. Este procedimento permitiu investigar a interação da energia fotogerada com a energia disponível na rede CA no ponto de conexão, e que é entregue à carga.

Os ensaios realizados em laboratório serviram de base para os ensaios realizados em instalações fotovoltaicas reais, que complementam os dados necessários para a análise da interação entre os inversores utilizados em SFCR e os parâmetros de qualidade de energia elétrica.

Ensaios em laboratório permitem a variação controlada dos parâmetros de qualidade da energia elétrica, sendo que o nível de tensão e frequência foram monitorados, mas mantidos estáveis; já o parâmetro THD foi sendo variado para observar o limiar de operação do inversor.

Visando explorar ao máximo os ensaios em laboratório, foi construída uma bancada de testes para permitir a monitoração da tensão, corrente e seus respectivos conteúdos harmônicos, da rede elétrica, da saída do inversor e nas cargas. As cargas são utilizadas para analisar a parcela de energia consumida junto ao ponto de geração e a parcela entregue à rede elétrica. Foram realizados ensaios com cargas lineares e não-lineares. A Figura 5 mostra a bancada implementada.



Figura 5 - Bancada implementada para ensaios em laboratório.

Para a realização de ensaios controlando-se os parâmetros de qualidade de energia, foi utilizada a fonte da marca SUPPLIER operando em CA, a fim de simular uma rede elétrica com diferentes características quanto ao nível de tensão, frequência de operação e conteúdo harmônico, visando identificar e quantificar os parâmetros críticos de operação dos inversores. A Figura 6 mostra as formas de onda de tensão e corrente obtidas com o osciloscópio na saída da fonte SUPPLIER: senóide pura (somente a fundamental), fundamental mais a terceira harmônica e fundamental mais a quinta harmônica, respectivamente.

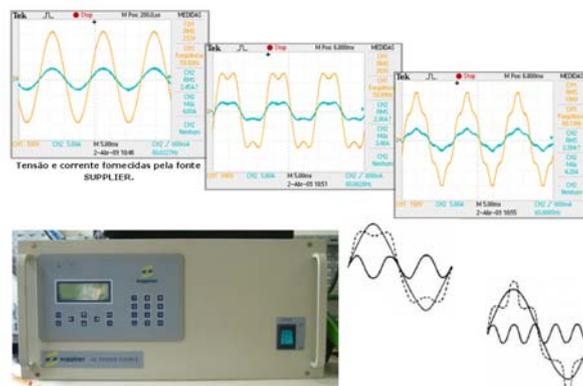


Figura 6 – Fonte SUPPLIER fornecendo: onda senoidal pura, fundamental mais terceira harmônica e fundamental mais quinta harmônica, respectivamente.

A Figura 7 mostra o painel fotovoltaico de 2kWp instalado e operando desde 1997 na cobertura do prédio da Engenharia Mecânica da UFSC (BEYER *et al.*, 2001) (RÜTHER e DACOREGIO, 2000).



Figura 7 – Painel fotovoltaico de 2kWp do LABSOLAR.

A Figura 8 mostra parte dos equipamentos utilizados nos ensaios realizados no LABSOLAR (Fonte SUPPLIER; osciloscópio TEKTRONIX; multímetro MINIPA; bancada de cargas e sistema fotovoltaico composto de um painel de 2kWp com módulos de silício amorfo e um inversor SMA modelo SB2500).

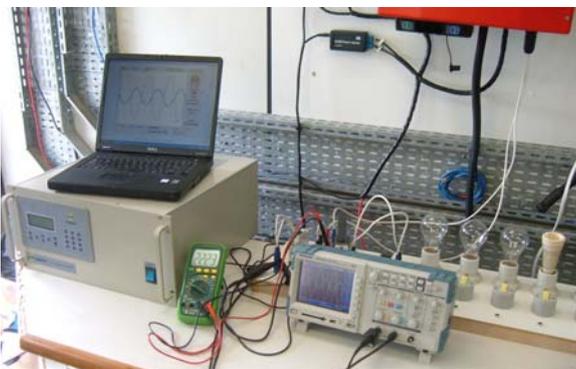


Figura 8 – Fonte SUPPLIER interligada ao inversor SMA SB2500.

### 2.3 Ensaios em SFCR

A realização de ensaios em sistemas fotovoltaicos em operação iniciou logo após as primeiras observações e análises dos parâmetros de qualidade de energia elétrica obtidos a partir dos ensaios em laboratório. Entretanto o processo é iterativo, e novos ensaios em laboratório foram realizados a fim de compreender melhor a interação entre a qualidade da energia elétrica e o funcionamento de inversores de SFCR.

Os ensaios em campo foram realizados em SFCR em operação no Brasil. A aquisição dos parâmetros de qualidade de energia em campo ocorreu inicialmente nos SFCR existentes na UFSC. Na sequência foi estendido para os SFCR da CELESC, ELETROSUL e TRACTEBEL em Florianópolis, e posteriormente na Indústria Zeppini em São Bernardo do Campo – SP. Portanto os SFCR analisados foram:

- LABSOLAR / UFSC / 2,02kWp;
- Centro de Convivência / UFSC / 1,1kWp;
- Centro de Cultura e Eventos / UFSC / 10,24kWp;
- CELESC (sede) / 1,4kWp;
- Casa Eficiente / ELETROSUL / 2,25kWp;
- ELETROSUL (sede) / 11,97kWp;
- Hospital Universitário / UFSC / TRACTEBEL / 1,99kWp;
- Colégio de Aplicação / UFSC / TRACTEBEL / 1,99kWp;
- Aeroporto Hercílio Luz / UFSC / TRACTEBEL / 2,12kWp;
- Motor Z / Grupo Zeppini / 2,45kWp;
- Fundação Estrela / Grupo Zeppini / 14,69kWp;

O SFCR instalado na Fundação Estrela pertencente ao Grupo Zeppini, recebeu especial atenção visto que a sua entrada em operação não foi possível de ser realizada como previsto inicialmente. A baixa qualidade da energia elétrica foi o fator preponderante que impediu a operação desse sistema. O mesmo só entrou em operação quando o ponto de conexão foi alterado do previsto inicialmente na Fundação Estrela, para outro ponto na Motor Z, uma edificação vizinha porém pertencente ao Grupo Zeppini, e com fornecimento de energia individualizado. O SFCR do Aeroporto Hercílio Luz também foi objeto de estudo mais apurado devido a constantes desligamentos do inversor em dias com temperaturas elevadas, pois no mesmo circuito onde foi conectado o inversor, existe um aparelho de ar condicionado que representa uma parcela considerável da carga elétrica desse circuito.

Esses ensaios referem-se basicamente à medição instantânea dos parâmetros de qualidade da energia elétrica, com o sistema fotovoltaico em operação e desligado, utilizando o osciloscópio TEKTRONIX TPS2012. Visando padronizar os ensaios em campo foi elaborado um roteiro de medições e o número de aquisições de THD<sub>v</sub> para cada inversor foi estabelecido com base no método estatístico para determinação do tamanho da amostra. Os ensaios foram realizados em dias úteis no horário compreendido entre as dez e quatorze horas e com irradiância superior a 700W/m<sup>2</sup>.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados em laboratório e em campo, foram gerados centenas de gráficos de Distorção Harmônica Total da tensão (THD<sub>v</sub>) e da corrente (THD<sub>i</sub>). Esses ensaios foram realizados com o inversor do SFCR operando e desligado. Dessa forma foi possível avaliar a condição da qualidade de energia no ponto de conexão com e sem a influência do sistema fotovoltaico.

Como o ensaio adotado reflete a condição apenas no instante da medição, os padrões para medição adotados, descritos na metodologia, são necessários para evitar que resultados aleatórios sejam obtidos, o que prejudicaria a análise. A vantagem de realizar a análise da qualidade da energia em um determinado ponto da instalação elétrica de uma residência, comércio ou indústria, de forma amostral, com osciloscópio, ao invés do método tradicional utilizando um analisador de rede, está na simplicidade e agilidade do ensaio; porém as condições de operação das cargas elétricas presentes na instalação devem ser conhecidas.

A Figura 9 mostra a forma de onda da tensão e da corrente no ponto de conexão de um SFCR, e as Figuras 10 e 11 o conteúdo harmônico da tensão e da corrente, respectivamente.

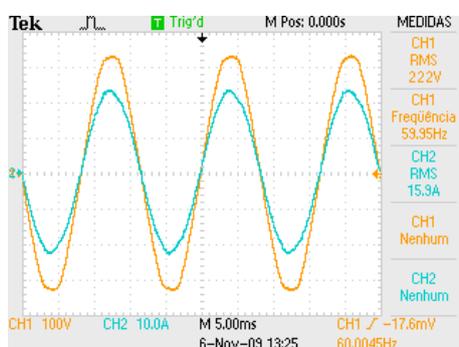


Figura 9 – Tensão e corrente na saída do inversor SB4000US da ELETROSUL em Florianópolis.

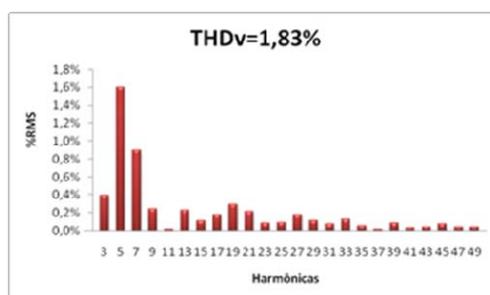


Figura 10 – Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão da ELETROSUL em Florianópolis.

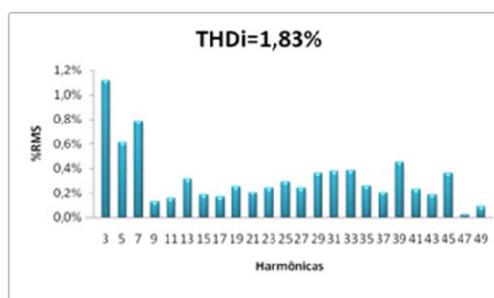


Figura 11 – Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor da ELETROSUL em Florianópolis.

Neste caso, com o inversor injetando corrente na rede e processando cerca de  $\frac{3}{4}$  da sua potência nominal, percebe-se o baixo conteúdo harmônico tanto da tensão quanto da corrente. Nas Figuras 12 e 13 a seguir, agora sem a geração fotovoltaica (inversor desligado), observa-se a qualidade da energia no ponto de conexão sem a influência do gerador fotovoltaico.

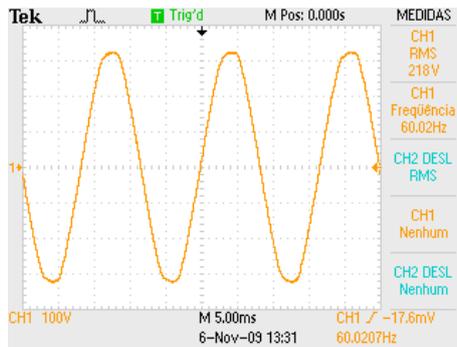


Figura 12 – Tensão no ponto de conexão da ELETROSUL em Florianópolis.

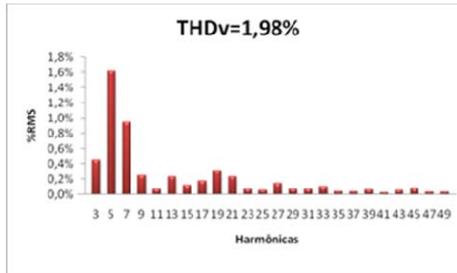


Figura 13 – Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, na ELETROSUL.

Comparando as Figuras 10 e 13 observa-se que a distorção harmônica total da tensão foi menor com o gerador fotovoltaico operando. Apesar de a medição ser realizada de forma amostral, em um período de tempo imediatamente posterior à condição do gerador fotovoltaico operando, essa característica de redução no conteúdo harmônico da tensão foi observada em cerca de 75% dos ensaios realizados. Outro aspecto relevante refere-se à amplitude da tensão no ponto de conexão, que se elevou com o inversor operando, ou seja, passou dos 218V (sem o gerador fotovoltaico) para 222V (com o gerador fotovoltaico). Ao considerarmos circuitos onde a tensão naturalmente esteja abaixo do valor nominal, haverá melhora desse parâmetro, porém se a tensão já estiver elevada e houver a conexão de muitos SFCRs, poderá haver sobre tensão no circuito (CAAMAÑO-MARTÍN *et al.*, 2008).

Quanto ao conteúdo harmônico da corrente, este é muito variável, e está diretamente relacionado às cargas conectadas ao circuito elétrico e, à medida que o  $THD_i$  aumenta, ocorre um leve aumento também na  $THD_v$ .

Já a Figura 14 mostra a tensão e a corrente no ponto de conexão do SFCR instalado no LABSOLAR, com o inversor processando cerca de 50% da sua potência nominal. As Figuras 15 e 16 apresentam os conteúdos harmônicos da tensão e da corrente respectivamente.

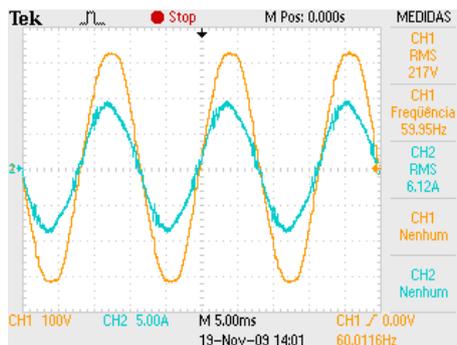


Figura 14 – Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do LABSOLAR.

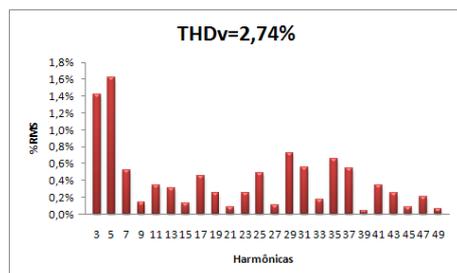


Figura 15 - Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no LABSOLAR.

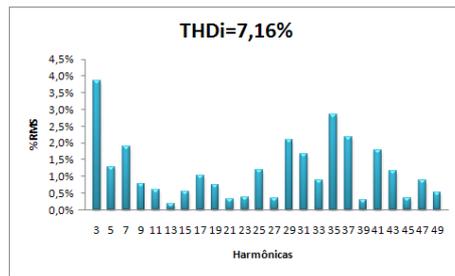


Figura 16 – Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor do LABSOLAR.

Na Figura 16 observa-se inclusive o valor de  $THD_I$  superior aos 5% previstos em norma, porém esse limite só é válido quando a  $THD_V$  já é naturalmente menor que 2%, o que não ocorre neste caso, conforme pode ser observado nas Figuras 17 e 18 a seguir.

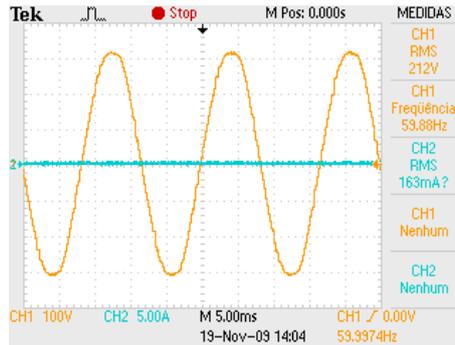


Figura 17 – Tensão no ponto de conexão no LABSOLAR.

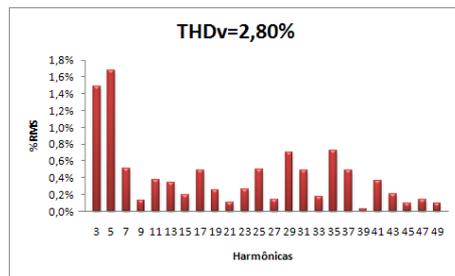


Figura 18 – Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no LABSOLAR.

Quanto à amplitude da tensão no ponto de conexão, também se observa uma melhora, passando dos 212V (sem o gerador fotovoltaico) para 217V (com o gerador fotovoltaico).

Os dois exemplos apresentados até aqui referem-se a SFCRs que entraram em operação e continuam operando normalmente, ou seja, a qualidade da energia no ponto de conexão já era boa no primeiro caso e satisfatória no segundo e com a instalação do SFCR houve melhora tanto na amplitude da tensão quanto na  $THD_V$ , para ambos os casos.

A seguir são apresentados outros dois casos que diferem entre si, porém o sintoma é a dificuldade em manter a conexão entre o inversor e a rede elétrica. Sob determinadas condições os inversores rejeitam a rede elétrica (acusando falha na CA) e se desconectam. O primeiro caso é em uma indústria metalúrgica em São Bernardo do Campo – SP, onde os três inversores lá existentes (dois SMC6000A e um SB2500, ambos da SMA), ao serem conectados no quadro elétrico inicialmente escolhido apresentaram o sintoma descrito. A Figura 19 mostra a forma de onda da tensão de linha e da corrente de uma fase para o quadro citado, e as Figuras 20 e 21 os respectivos conteúdos harmônicos.

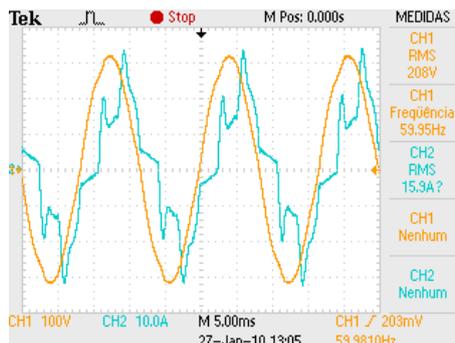


Figura 19 – Tensão  $V_{AB}$  e corrente  $I_A$  medidos no quadro elétrico 01 da Indústria Zeppini, em São Bernardo do Campo.

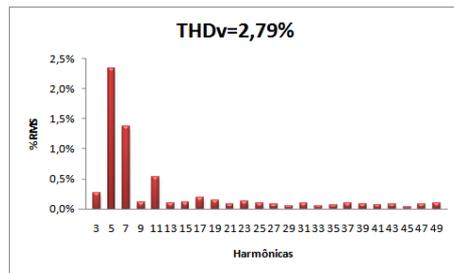


Figura 20 – Componentes harmônicos da tensão  $V_{AB}$  na Indústria Zeppini.

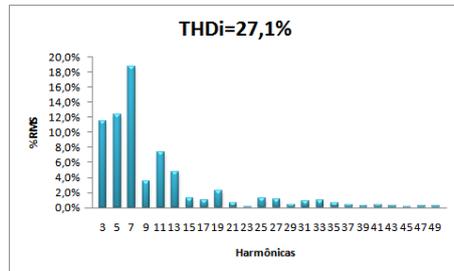


Figura 21 – Componentes harmônicos da corrente  $I_A$  na Indústria Zeppini.

As tensões de linha  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  apresentaram  $THD_V$  de 2,11% e 2,12% respectivamente, e as correntes  $I_B$  e  $I_C$ ,  $THD_I$  de 37,9% e 52,7%. Percebe-se aqui o elevado conteúdo harmônico da corrente, devido à presença de muitas cargas não lineares, porém o conteúdo harmônico da tensão é baixo. Isto ocorre devido à baixa impedância no ponto analisado, ou seja, elevada potência de curto circuito. Neste caso a simples análise da  $THD_V$  não é suficiente para prever dificuldades na conexão do SFCR, porém o formato da corrente e conseqüentemente seu elevado conteúdo harmônico, servem de alerta para possíveis problemas na conexão.

Nessa condição os inversores acusavam falha de rede quase que na totalidade do tempo, impedindo a conexão. Dois caminhos foram seguidos para colocar em operação os equipamentos: 1) Buscar outro ponto de conexão (quadro elétrico) e medir com o osciloscópio as formas de onda de tensão e corrente nas três fases e também seus conteúdos harmônicos; 2) Manter o ponto de conexão inicialmente escolhido e alterar parâmetros operacionais do inversor.

Um segundo quadro elétrico foi escolhido e as tensões de linha  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  apresentaram  $THD_V$  de 2,05%, 2,20% e 4,11% respectivamente, e as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ ,  $THD_I$  de 5,99%, 12,30% e 3,55%. A qualidade de energia nesse segundo quadro elétrico em relação ao primeiro é superior e ele foi adotado como novo ponto de conexão, porém antes de realizar esse trabalho, partiu-se também para a segunda opção, alterar parâmetros de operação do inversor. Os parâmetros alterados foram: Variação da impedância CA; Tensão CA máxima e mínima; e limites da frequência CA. O parâmetro relativo à frequência foi alterado para permitir a conexão quando entra em operação um gerador diesel que nos horários de ponta ou em uma falta, com o auxílio de um circuito automático, isolam a rede comercial e alimentam a indústria. As Figuras 22, 23 e 24 mostram as aquisições e gráficos de THD para um inversor SMA modelo SMC6000A operando com cerca de 15% da potência nominal, no primeiro quadro elétrico citado e já com seus parâmetros alterados.

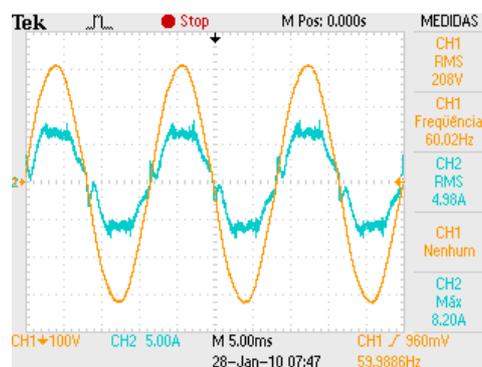


Figura 22 – Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A da Indústria Zeppini.

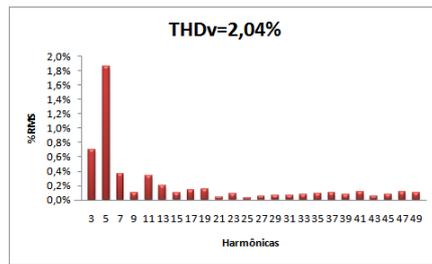


Figura 23 - Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na Indústria Zeppini.

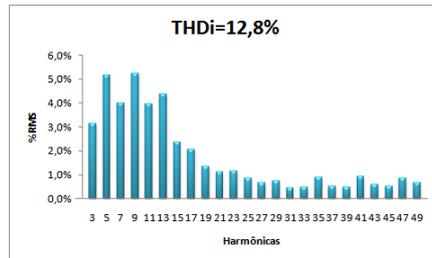


Figura 24 – Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor da Indústria Zeppini.

A conexão foi estabelecida, porém para garantir que a máxima geração fotovoltaica não fosse prejudicada por desligamentos aleatórios, o ponto de conexão foi alterado para o segundo quadro com melhor qualidade de energia, e os parâmetros dos inversores foram ajustados para essa nova condição.

O outro caso de desconexão do inversor do SFGR foi detectado no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis - SC. Neste caso, em dias quentes, equipamentos de ar condicionado ligados na mesma rede elétrica do inversor ao entrarem em operação, provocavam um transitório na rede, que por sua vez causava o desligamento também momentâneo do inversor, reduzindo a geração diária. A Figura 25 mostra a forma de onda da tensão e da corrente no ponto de conexão, e as Figuras 26 e 27 os conteúdos harmônicos da tensão e da corrente.

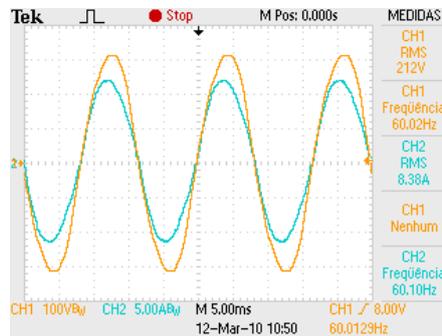


Figura 25 – Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis.

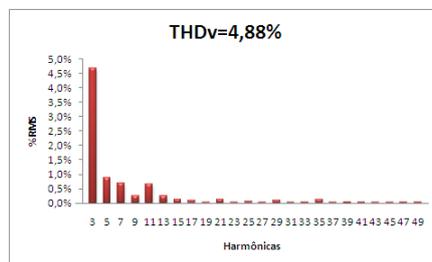


Figura 26 - Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no Aeroporto.

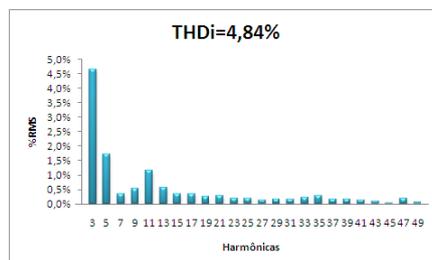


Figura 27 - Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor do Aeroporto.

Nas Figuras 28 e 29 é possível observar dois parâmetros importantes quando não há influência da geração fotovoltaica; a tensão no ponto de conexão está baixa (202V), e a  $THD_V$  é elevada (5,00%). Novamente percebe-se ao voltar às Figuras 25 e 26 que esses valores melhoram quando a geração fotovoltaica está presente; a tensão no ponto de conexão vai para 212V, e a  $THD_V$  cai para 4,88%.

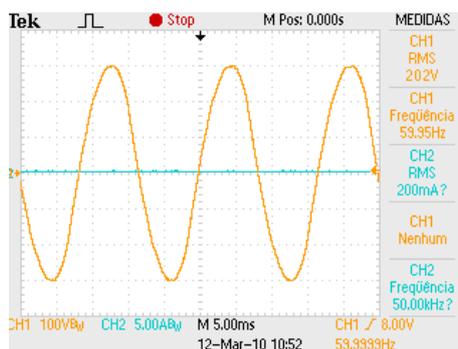


Figura 28 - Tensão no ponto de conexão no Aeroporto.

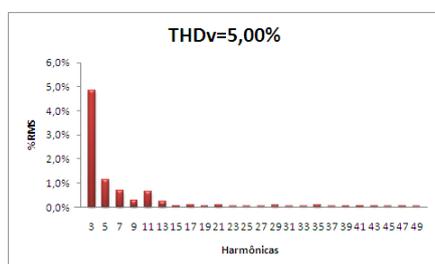


Figura 29 – Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Aeroporto.

Neste caso a solução para evitar desligamentos do inversor, foi conseguida apenas alterando os parâmetros já citados anteriormente e não houve a necessidade de alterar o ponto de conexão do sistema fotovoltaico.

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados demonstram a interação entre o funcionamento dos inversores de SFCR e a qualidade da energia elétrica no ponto de conexão. Percebe-se que a entrada em operação dos inversores eleva a tensão e reduz o conteúdo harmônico da tensão, melhorando a qualidade da energia. O conteúdo harmônico da corrente injetada pelo inversor é fortemente influenciado pelas cargas presentes no circuito elétrico, se houver a presença de cargas não lineares, que drenam da fonte correntes pulsadas, o inversor fornecerá parte dessa corrente também pulsada, conforme requerido pela carga, conseqüentemente a  $THD_I$  será elevada, superior aos 5% previstos em norma. Instalações com alta potência de curto circuito, por possuírem baixa impedância, apresentam baixa  $THD_V$ , porém se houver a presença de muitas cargas não lineares a  $THD_I$  será elevada, podendo inclusive impedir a conexão dos inversores, sendo que os mesmos rejeitam a rede elétrica, acusando falha na CA. Portanto, observa-se que a baixa qualidade da energia no ponto de conexão pode até levar ao não funcionamento dos inversores de SFCR. Esse fato leva à necessidade de que seja realizada a análise da energia no ponto onde se pretende efetivar a conexão do inversor do SFCR. O método proposto de análise baseado na observação da forma de onda da corrente, e no conteúdo harmônico da tensão e da corrente mostra-se viável para a escolha do ponto de conexão que garanta o bom desempenho do SFCR. Pressupondo a instalação em larga escala de SFCR no Brasil, a realização de um diagnóstico prévio da qualidade de energia no ponto de conexão passa a ser mais um quesito desejável para que o país ingresse com sucesso no uso desta tecnologia.

#### REFERÊNCIAS

- BAUMGARTNER, F. P.; SCHMIDT, H.; BURGER, B.; BRÜNDLINGER, R.; HAEBERLIN, H.; ZEHNER, M. *Status and relevance of the DC voltage dependency of the inverter efficiency: 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Milano, 2007.*
- BEYER, H. G.; RÜTHER, R.; KREUTZER, N. *Estimation of the yield of building integrated a-Si PV installations in Brazil based on long term performance data of a 2kWp system: 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference Munich, Germany, 2001.*

- CAAMAÑO-MARTÍN, E.; LAUKAMP, H.; JANTSCH, M.; ERGE, T.; THORNYCROFT, J.; MOOR, H. D.; COBBEN, S.; SUNA, D.; GAIDDON, B. *Interaction between photovoltaic distributed generation and electricity networks. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Issue 7, v.16, p.629-643, 2008.*
- DRIESSE, A.; JAIN, P.; HARRISON, S. *Beyond the curves: Modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters: 33st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, 2008.*
- HAEBERLIN, H. *Evolution of inverters for grid connected PV-systems from 1989 to 2000: 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, Germany, 2001.*
- \_\_\_\_\_. *Optimum DC operating voltage for grid-connected PV plants: Choice of  $V_{mpp}$  for measurement of efficiency and  $V_{mpp-stc}$  at PV plants for grid-connected inverters with a wide DC input voltage range: 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Barcelona, Spain, 2005.*
- HAEBERLIN, H.; BORGNA, I.; KAEMPFER, M.; ZWAHLEN, U. *New tests at grid-connected PV inverters: Overview over test results and measured values of total efficiency: 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference. Dresden, Germany, 2006.*
- HESKES, P. J. M.; ENSLIM, J. H. R. *Power quality behaviour of different photovoltaic inverter topologies: PCIM-2003, 24th International Conference. Nürnberg, 2003.*
- JUNG, C. F. *Metodologia para pesquisa & desenvolvimento - Aplicada a novas tecnologias, produtos e processos: Axcel Books do Brasil. Rio de Janeiro, 2004.*
- KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. *A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. Industry Applications, IEEE Transactions on. Issue 5, v.41, p.1292-1306, 2005.*
- LIMSAKUL, C.; SANGSWANG, A.; CHENVIDHYA, D.; SEAPAN, M.; MEUNPINIJ, B.; CHAYAVANICH, N.; JIVACATE, C. *An impedance model of a PV grid-connected system: 33st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, 2008.*
- MARTINS, D. C.; BARBI, I. *Eletrônica de potência: Introdução ao estudo dos conversores CC-CA: Florianópolis, 2005.*
- RAUEN, F. J. *Roteiros de investigação científica: Unisul. Tubarão, 2002.*
- REN21. *Renewables 2009 update - Global Status Report. p.32, 2009.*
- RÜTHER, R.; DACOREGIO, M. M. *Performance assessment of a 2 kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installation in Brazil. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Issue 2, v.8, p.257-266, 2000.*
- SMA. *Course of inverter SMA. Niestetal 2008.*

## ELECTRIC POWER QUALITY AND THE INVERTERS OPERATION OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Abstract.** This article presents results on the analysis accomplished in several grid connected PV systems under the focus of the power quality in the connection point, verifying the influence of the PV energy on the power quality of the grid, as well as the influence of the power quality in the operation of the inverters. It was observed that in general the power quality at the PV system connection point improved when compared with the original parameters before the PV system was introduced. However, there were situations where the low power quality of the local grid either resulted in a reduced PV system performance, or altogether make impossible the operation of the grid connected PV system.

**Key words:** Grid connected photovoltaic systems, Power quality, Inverters