

Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irradiados em Sistemas Fotovoltaicos

Faiossander Suela, Carlos E. F. Caetano e José O. S. Paulino

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil.
faio_eng@hotmail.com

Resumo—O processo de conversão de energia c.c. para c.a. realizada por conversores em um sistema fotovoltaico (SFV) gera ruídos em uma ampla faixa de frequência. Esses ruídos, além de serem conduzidos dos conversores para os painéis fotovoltaicos, podem irradiar campos eletromagnéticos para o ambiente. No Brasil não existem normas específicas que regulam os níveis de radiação eletromagnética em SFV, portanto, se faz necessário estabelecer mecanismos capazes de verificar se os níveis de radiação provenientes do SFV são toleráveis. Desta maneira, este trabalho tem o objetivo de medir o campo elétrico que é irradiado por um SFV no ambiente, e analisar se estes campos podem ter algum efeito nocivo a equipamentos eletrônicos ou à saúde dos indivíduos que circulam próximo a estes sistemas. Foi investigado também o efeito do tamanho dos cabos no mecanismo de radiação eletromagnética. O sistema avaliado neste trabalho é parte complementar de uma usina de 1.42 MW_p, instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão), em Belo Horizonte. Os resultados apresentados neste trabalho comprovam que o funcionamento da usina gera uma elevação significativa no nível do campo elétrico no ambiente, principalmente em frequências entre 1 e 50 MHz, no entanto, este campo cai para o nível de ruído ambiente a poucos metros da fonte, não representando um risco para sistemas ou indivíduos localizados acima das arquibancadas do estádio.

Palavras Chave—Medição de Ruído Irrradiado, Interferência Eletromagnética Irradiada, Compatibilidade Eletromagnética, Sistemas Fotovoltaicos.

I. INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica está entre as energias alternativas que apresenta um maior crescimento de implantação nos últimos anos em todo o mundo. Embora tenha grande potencial de geração deste tipo de energia, o Brasil está muito atrás de alguns países que possuem potenciais de geração bem menores, mas que vem investindo alto neste seguimento, como é o caso da Alemanha, Espanha, Itália e outros. No entanto, a crise no setor energético vivido atualmente tem demonstrado a necessidade de uma ampliação da capacidade de geração de energia no país. Os problemas de impactos ambientais envolvidos na construção de novas hidroelétricas, aliado a escassez de chuva experimentada em algumas regiões

do país nos últimos anos, torna a geração fotovoltaica uma boa alternativa para o problema. Atualmente, através de subsídios e redução de impostos, o governo vem tentando estimular a utilização de geração fotovoltaica no país, e alguns projetos de grandes usinas fotovoltaicas estão em andamento [1].

A energia fotovoltaica já se mostrou uma ótima alternativa para suprir algumas demandas, principalmente no que diz respeito a sistemas isolados e geração distribuída. No entanto, estes sistemas apresentam alguns problemas de qualidade de energia, que podem ser inseridos na rede elétrica ou até mesmo irradiados no ambiente. Como a energia fotovoltaica é gerada em c.c., é necessária a conversão da mesma para c.a. de maneira que esta energia possa ser inserida no sistema elétrico. Essa conversão é feita através dos conhecidos conversores c.c.-c.a.. Já é amplamente entendido que o processo de conversão c.c.-c.a. gera diversos problemas de transitórios eletromagnéticos, causados pelo rápido chaveamento da tensão, que gera um conteúdo harmônico (ruídos) significativo em uma ampla faixa de frequência. Este ruído não somente é conduzido do inversor para o painel através dos cabos c.c., mas também pode ser irradiado para o ambiente por estes cabos, que atuam como uma antena no sistema, podendo causar interferências em dispositivos eletrônicos, equipamentos de rádio, e a seres humanos [2], [3], [4]. Este processo é representado na Figura 1.

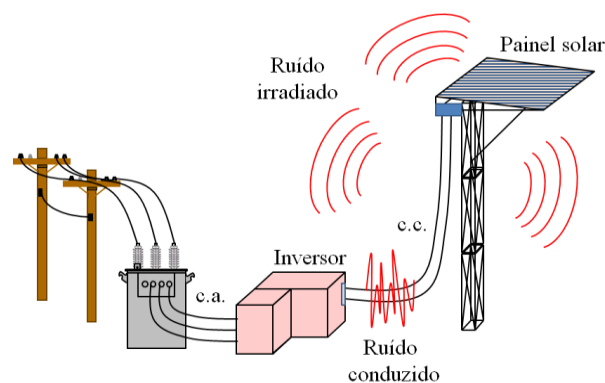


Fig. 1. Interferência eletromagnética conduzida e irradiada no lado c.c. de um sistema fotovoltaico.

Os conversores c.c.-c.a. são equipamentos que utilizam dispositivos semicondutores para o chaveamento da tensão contínua, a fim de convertê-la em tensão alternada. Este chaveamento geralmente é realizado através de um controle PWM de alta frequência (que em geral é de algumas dezenas de kHz), para evitar poluições harmônicas de baixa frequência e reduzir o tamanho físico dos conversores [5]. Assim, os conversores c.c.-c.a. podem ser considerados uma potencial fonte de ruído que é conduzido através dos cabos c.c. e irradiado para o ambiente através dos mesmos. Embora o chaveamento dos conversores seja de algumas dezenas de kHz, existem as componentes de frequência relacionada ao tempo de subida e aos transitórios eletromagnéticos dos pulsos PWM que estão na faixa de algumas dezenas a centenas de MHz [6]. Além disso, as indutâncias longitudinais e as capacitâncias transversais distribuídas ao longo do cabo c.c. devido a sua grande extensão, e ainda as capacitâncias dos painéis devido a sua grande área, podem representar um circuito ressonante para várias frequências [2], [3]. De fato, alguns estudos mostram que ruídos irradiados na faixa de algumas dezenas de kHz até centenas de MHz são observados, em amplitudes significativas, quando os inversores são ligados. Em [3] o autor propõe um modelo para representar o circuito equivalente de um sistema fotovoltaico. Este modelo além de considerar os parâmetros distribuídos ao longo do sistema, a fim de descrever o circuito ressonante e o ruído conduzido, considera também parâmetros que representam a parcela do ruído que é irradiado para o ambiente. Em [7] é feita uma análise do efeito dos painéis no processo de irradiação do ruído, neste trabalho é possível verificar que o cabo é o fator determinante, no entanto, os painéis também contribuem significativamente no nível de ruído que é irradiado.

Aliado a tudo isso, não existe no Brasil uma legislação específica com o objetivo de normalizar as radiações provenientes desses sistemas, e muito menos um controle de qualidade rigorosa dos inversores de frequência instalados no país, no que diz respeito a níveis de radiação eletromagnética. Assim não é possível prever, de maneira eficiente, a quantidade de ruído que será irradiado por uma usina de grande porte que empregará vários destes inversores.

O que existe na prática são resoluções da Anatel que regulamentam os limites máximos de exposição a campos eletromagnéticos. Estas resoluções estabelecem que o nível máximo de exposição da “população em geral” é de 149 dB μ V/m para a faixa de frequência em estudo neste trabalho [8]. Em equipamentos de rádio, o limite de exposição é de 125 dB μ V/m na faixa de 0.15 – 150 MHz [9]. Em virtude destes valores, e pela inexistência de normas específicas para SFV, é importante gerar uma base de dados de medições em regiões que possam ter seu ambiente eletromagnético alterado.

Este trabalho pretende dar uma contribuição no entendimento do ambiente eletromagnético em locais próximos a grandes SFV, fazendo uma análise técnica dos níveis de radiação encontrados e os possíveis danos associados a eles. O trabalho tem se desenvolvido nas dependências de uma usina fotovoltaica instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão), que tem uma potência instalada de 1.42 MW_p. Além de empregar uma

grande quantidade de conversores, esta usina possui cabos c.c. da ordem de algumas dezenas e até centenas de metros. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é medir e analisar o perfil do campo elétrico irradiado em uma ampla faixa de frequência (10kHz – 50MHz) nas proximidades da usina, com a finalidade de identificar se estes ruídos podem ou não causar interferências eletromagnéticas em sistemas e instalações nas proximidades da planta, e caso necessário, propor soluções para a atenuação destes ruídos.

II. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS CABOS NO PROCESSO DE IRRADIAÇÃO DE RUÍDO ELETROMAGNÉTICO

A influência do tamanho dos cabos em diversos problemas de transitórios eletromagnéticos já é estudado há algum tempo. Já se sabe que existe uma relação direta entre o tamanho do cabo e o nível de sobretensão transitória que pode ser gerado pelo chaveamento de tensão. Estes transitórios eletromagnéticos possuem conteúdo harmônico de amplitudes elevadas em uma ampla faixa de frequência e, consequentemente, são conduzidos pelos cabos [6]. SFV empregam, em sua maioria, dezenas ou até centenas de conversores c.c.-c.a. e cabos c.c. de grandes extensões, assim estes cabos podem conduzir ruídos com frequências de algumas dezenas a centenas de kHz devido ao chaveamento dos conversores e ainda ruídos de algumas dezenas a centenas de MHz devido aos transitórios eletromagnéticos.

Além disso, cabos de grandes extensões não podem simplesmente ser tratados como um condutor perfeito. As indutâncias longitudinais e as capacitâncias transversais devem ser consideradas. Desta forma o cabo pode representar um, circuito ressonante em uma ampla faixa de frequência. Um estudo detalhado sobre estas características pode ser encontrado em [3].

Até agora foi discutido como o tamanho do cabo pode influenciar no nível e frequência do ruído que o mesmo conduz. No entanto, o tamanho do cabo pode também influenciar no nível de ruído eletromagnético que é irradiado para o ambiente. Uma antena monopolo consiste em um fio fino alimentado ou excitado em sua extremidade. A teoria de antena mostra que o tamanho físico ideal de uma antena monopolo corresponde à metade do comprimento de onda do sinal de operação. Em outras palavras, uma antena monopolo irradia de maneira mais eficiente sinais cujo comprimento de onda é o dobro do seu tamanho físico [10]. Baseado nisso, os condutores c.c. de um SFV podem ser considerados uma antena monopolo. Como o SFV estudado neste trabalho possui cabos c.c. da ordem de 100 m, essa usina irradia de maneira eficiente ruídos cujo comprimento de onda é da ordem de 200 m, ou seja, sinais na faixa de 15 MHz. Uma investigação experimental a respeito desta hipótese foi realizada. A metodologia de medição e os resultados obtidos são apresentados na Seção V.

III. PLANTA FOTOVOLTAICA SOB ESTUDO

A usina estudada neste trabalho está instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão), e ligada à rede de energia. Esta usina é composta de 5.910 painéis que estão distribuídos na cobertura do estádio. Estes painéis estão

ligados em 88 inversores que estão divididos em 8 salas com 11 inversores cada. As salas ficam localizadas sob as arquibancadas do estádio. Uma visão superior da usina é apresentada na Figura 2, onde a textura em azul representa os módulos fotovoltaicos distribuídos ao longo da cobertura do estádio e as ranhuras em vermelho representam o agrupamento de painéis correspondentes a cada uma das 8 salas de inversores.

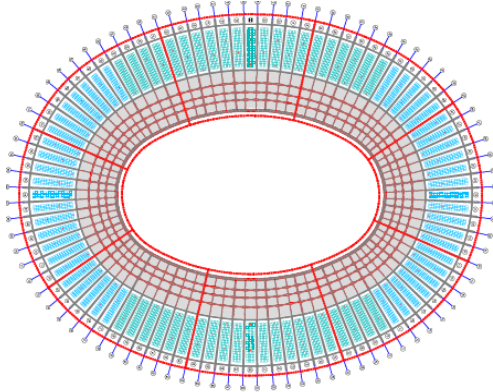


Fig. 2. Visão superior da Central Fotovoltaica do Estádio Mineirão.

IV. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

A análise experimental apresentada neste trabalho foi dividida em duas partes principais:

Parte A: Consistiu em um estudo prático para verificar os efeitos de irradiação dos cabos de um SFV, quando estes se comportam como antenas capazes de irradiar ruído para o ambiente, e a influência do comprimento deste cabo na frequência dos ruídos que são irradiados.

Parte B: Consistiu na medição e análise do perfil do campo elétrico irradiado nas proximidades da usina fotovoltaica do estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão).

Para a medição de ruído irradiado são necessários dois equipamentos básicos: um analisador de espectro, que é um dispositivo capaz de medir sinais no domínio da frequência, e uma antena, que é o sensor de campo elétrico e deve ser ligado ao analisador através de um cabo coaxial. Os modelos utilizados neste projeto estão descritos abaixo.

- Analisador de espectro (*Anritsu MS2712E*) que opera em uma faixa de frequência de 9 kHz a 3 GHz.
- Antena monopolo (*Active Monopole Antenna-ETS Lindgren 3301C*) que opera na faixa de 30 Hz a 50 MHz.

A. Análise experimental da influência do tamanho dos cabos no mecanismo de irradiação de campos eletromagnéticos

Para validar a hipótese dos cabos de um SFV agirem como antenas para determinadas frequências, uma investigação experimental foi realizada. O experimento consiste em aplicar

um sinal de alta frequência na extremidade de um cabo e medir o ruído irradiado nas proximidades deste cabo. Para gerar o sinal de alta frequência foi utilizado um gerador de onda arbitrária, e para medir o ruído irradiado foram utilizados o analisador e a antena descritos anteriormente. Um esquema do *setup* de medição pode ser visto na Figura 3.

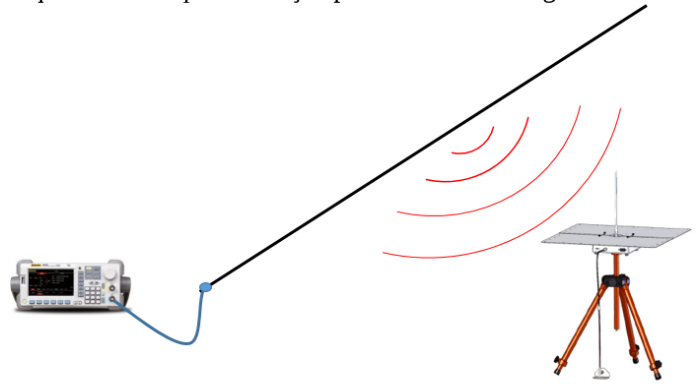


Fig. 3. Setup de medição do ruído irradiado por um cabo excitado na extremidade.

Primeiramente, um cabo de 1 m e outro de 100 m de comprimento foram excitados por uma onda quadrada de 10 kHz. Mediu-se então o ruído em um eixo transversal ao comprimento do condutor, a 3 m de distância do seu centro.

Como o SFV em estudo possui cabos de aproximadamente 100 m de comprimento, uma análise similar a anterior foi realizada com a finalidade de se verificar os níveis de ruído que são irradiados por esse comprimento de cabo no intervalo de 1 a 100 MHz.

Os resultados desta etapa do projeto podem ser visualizados na primeira parte da seção V.

B. Metodologia de medição do ruído irradiado nas proximidades do SFV

Como dito anteriormente, o SFV emprega dezenas de inversores, o que constitui uma fonte de ruído em uma ampla faixa de frequência, além de possuir cabos de centenas de metros, que demonstrou se comportar como uma boa antena para ruídos em uma faixa de frequência de dezenas de MHz. Desta forma, medições de ruídos foram realizadas em alguns pontos da usina.

Devido às dimensões e a complexidade de acesso a diferentes pontos ao longo dos cabos c.c., foram realizadas medições nas salas dos inversores e na arquibancada do estádio, local que representa a maior circulação de pessoas, portanto, maior preocupação com os níveis das radiações presentes no ambiente. O ruído foi medido na faixa de frequência de 100 kHz a 50 MHz.

Na sala dedicada aos inversores foram realizadas duas configurações de medição: uma com a usina desligada, com a finalidade de caracterizar o ruído ambiente, e outra com a usina em funcionamento. A medição foi realizada com a antena posicionada no centro da sala, como representado no desenho esquemático da Figura 4.

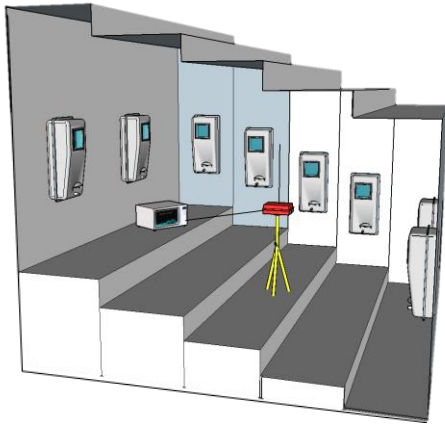


Fig. 4. Configuração de medição em uma das salas de inversores.

Também foram realizadas medições na arquibancada, com a finalidade de verificar se o ruído irradiado poderia afetar de alguma forma os equipamentos ou pessoas presentes no estádio. As medições ocorreram no ponto imediatamente acima do centro da sala dos inversores. Os resultados desta etapa são apresentados na segunda parte da seção V.

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados e as análises deste trabalho estão divididos em duas partes. Estas partes correspondem às duas metodologias apresentadas na seção anterior.

A. Resultados da Análise experimental da influência do tamanho dos cabos no mecanismo de irradiação de campos eletromagnéticos

A Figura 5 apresenta o espectro de frequência do sinal aplicado aos cabos, no intervalo de 10 a 100 kHz, e a Figura 6 mostra a comparação entre o ruído irradiado pelo cabo de 1 m, 100 m e o ruído ambiente para o mesmo intervalo de frequência, conforme a metodologia descrita na parte A da seção IV.

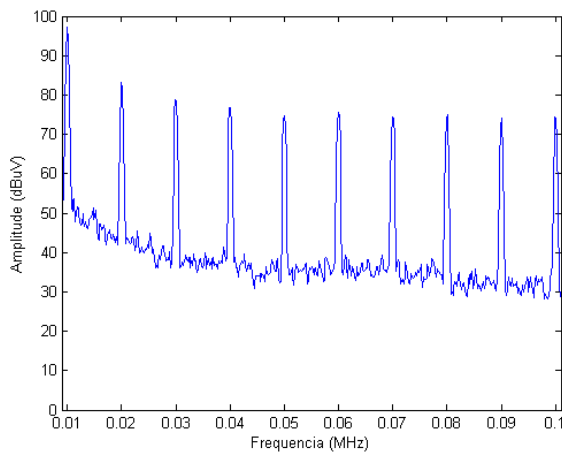


Fig. 5. Espectro de frequência do sinal de excitação dos cabos.

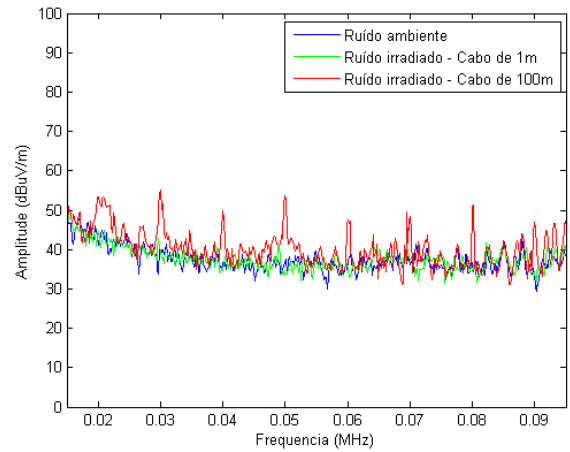


Fig. 6. Ruído irradiado medido a 3m do cabo.

A partir da Figura 6, é possível perceber que o cabo de 1 m não irradia ruído na faixa de frequência analisada. Por outro lado, o cabo de 100 m irradia uma pequena parcela deste ruído para o ambiente. Este resultado é coerente, já que, em teoria, os cabos de 1 e 100 m deveriam se comportar como uma boa antena para sinais de 150 MHz e 1,5 MHz respectivamente.

Para a análise do ruído irradiado por um cabo de 100 m de comprimento, que é mais representativo do ponto de vista dos comprimentos reais encontrados em um SFV de grande porte, uma análise parecida a anterior foi realizada. Porém, neste caso, uma onda quadrada de 5 MHz foi injetada na extremidade do cabo de 100 m. O espectro de frequência da fonte e o ruído medido podem ser observados nas Figuras 7 e 8 respectivamente.

É fácil perceber, pela análise destas figuras, que um cabo de 100 m funciona como uma boa antena para sinais de algumas dezenas de MHz. Desta forma, é possível traçar uma analogia direta deste estudo com o estudo do SFV. O resultado obtido neste experimento é um indicativo de que o SFV estudado neste trabalho pode irradiar ruídos com amplitudes significativas em uma ampla faixa de frequência.

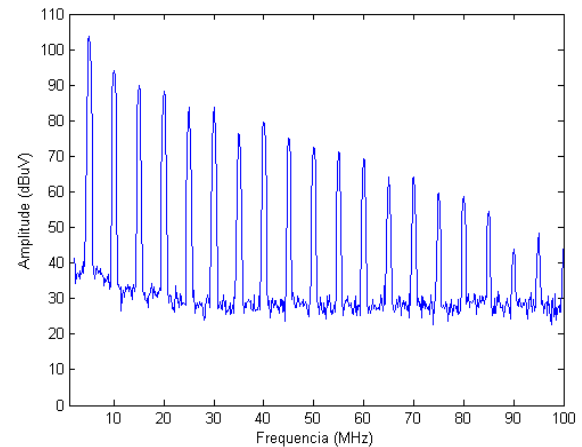


Fig. 7. Espectro de frequência do sinal de excitação do cabo de 100 m.

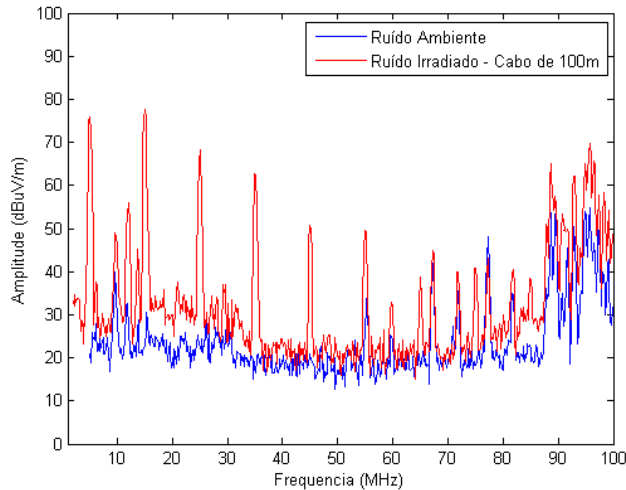


Fig. 8. Ruído irradiado medido a 3 m do cabo.

B. Resultados das medições do ruído nas proximidades do SFV

Os resultados apresentados através das Figuras 9 e 10, mostram uma comparação do ruído presente no centro da sala dos inversores, na região da arquibancada imediatamente acima da sala e do ruído ambiente (usina desligada), conforme a metodologia apresentada na parte B da seção IV.

A Figura 9 deixa claro que o funcionamento da usina não afeta significativamente o ruído irradiado na faixa de 100 kHz a 1 MHz, onde é observado apenas uma pequena elevação deste ruído na sala dos inversores. Por outro lado, a Figura 10 comprova que na faixa de 1 MHz a 50 MHz existe uma elevação significativa do ruído presente na sala dos inversores quando a usina entra em operação. Este resultado está coerente com os resultados obtidos na análise do efeito do tamanho dos cabos no mecanismo de irradiação, que mostrou que os cabos de 100 m irradiam de maneira eficiente ruídos na faixa de 15 MHz.

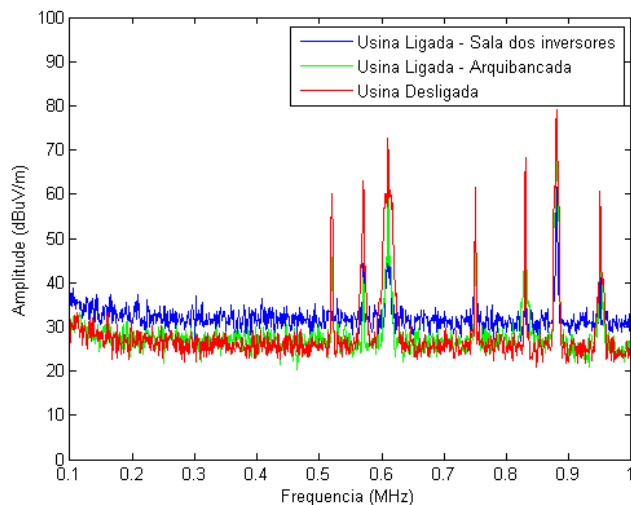


Fig. 9. Ruído irradiado na faixa de 100 kHz a 1 MHz.

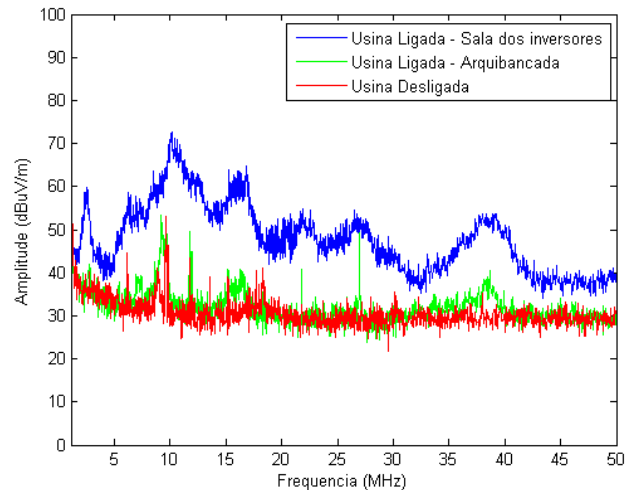


Fig. 10. Ruído irradiado na faixa de 1 MHz a 50 MHz.

Através dos resultados obtidos é possível observar, também, que o nível de ruído na arquibancada decai abruptamente para o nível de ruído ambiente, mesmo para as frequências mais elevadas, não representando, assim, um risco para pessoas ou equipamentos eletrônicos localizados nessa região. É importante salientar que este resultado não pode ser considerado uma regra, já que os cabos c.c. desta usina estão confinados em locais de difícil acesso sob a estrutura do estádio. Assim, novas medições devem ser realizadas em usinas com topologias e tamanho diferentes, a fim de traçar um perfil generalizado dos ruídos que são irradiados em sistemas fotovoltaicos.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível medir e analisar o perfil do campo elétrico irradiado em uma ampla faixa de frequência (100kHz – 50MHz) nas proximidades de uma usina fotovoltaica. Foi possível verificar que o tamanho do cabo exerce uma influência significativa no que diz respeito ao nível de ruído irradiado em determinadas frequências. Os cabos agem como uma antena irradiando parte do ruído conduzido pelos mesmos, estes cabos irradiam de maneira mais eficiente ruídos em que o comprimento de onda é o dobro do tamanho físico dos cabos. Na usina investigada foi possível observar uma elevação significativa do campo elétrico irradiado, quando a usina entra em operação, principalmente na faixa de frequência de 1 MHz a 50 MHz. No entanto, esta elevação só é observada em pontos próximos aos inversores, nas arquibancadas o ruído irradiado decai abruptamente para o nível de ruído ambiente. Assim, é possível concluir que um SFV é capaz de causar uma elevação significativa do ruído ambiente em uma ampla faixa de frequência, no entanto, na planta estudada neste projeto, esta elevação não é capaz de causar danos a equipamentos ou a pessoas, segundo os valores definidos por [8] e [9]. Além disso o ruído neste caso é intenso apenas nas salas dos inversores, locais que, de forma geral, só estão presentes os equipamentos que compõe o SFV e, eventualmente, os agentes responsáveis pela manutenção do sistema.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) através do P&D ANEEL D-470 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] Energia Solar Fotovoltaica no Brasil – Subsídios para Tomada de decisão. 02/10 Série Documentos Técnicos, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Maio 2010.
- [2] M. C. Di Piazza, C. Serporta, G. Tinè and G. Vitale, “Electromagnetic Compatibility Characterization of the DC Side in a Low Power Photovoltaic Plant,” IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Tunisia, vol. 2, pp. 672-677, December 2004.
- [3] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi and S. Bertone, “EMC Issues in High-Power Grid Connected Photovoltaic Plants,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Vol. 51, issue: 3, pp. 639-648, August 2009.
- [4] N. Henze and T. Degner, “Radio Interference of Photovoltaic Power System,” 16th International Wroclaw Symposium and Exhibition on EMC. Wroclaw, Poland, pp. 1-6, June 2002.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, “Power Electronics: Converters, Applications and Design,” Wiley, 3rd edition, 2002.
- [6] H. de Paula, M. V. C. Lisboa, J. F. R. Guilherme, W. C. Boaventura e M. L. R. Chaves, “Novas Contribuições ao Estudo das Sobreensões Transitórias e Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamentos de Motores por Inversores,” VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas, Brasil, August 2008.
- [7] I. Wu, T. Shinozuka, S. Ishigami and Y. Matsumoto, “Evaluate of Electromagnetic Radiation from the DC Side of a Photovoltaic Power Generation System,” IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. Vol. 4, issue: 2, pp. 73-81, August 2015.
- [8] Anatel, Resolução nº 303, “Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9KHz e 300 GHz,” 2002.
- [9] CISPR 20, “Sound and television broadcast receivers and associated equipment - Immunity characteristics - Limits and methods of measurement,” 6 edition, 2006.
- [10] M. N. O. Sadiku, “Elementos de Eletromagnetismo”. Bookman, 3^a edição, 2004.