

**JAIR URBANETZ JUNIOR**

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDES DE  
DISTRIBUIÇÃO URBANAS: SUA INFLUÊNCIA NA  
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E ANÁLISE DOS  
PARÂMETROS QUE POSSAM AFETAR A CONECTIVIDADE**

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, para a obtenção do título de DOUTOR em Engenharia Civil.

*Orientador:* Prof. Ricardo Rüther, Ph.D

Florianópolis-SC  
2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

U72s Urbanetz Junior, Jair

Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas [tese] : sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade / Jair Urbanetz Junior ; orientador, Ricardo Rütther. - Florianópolis, SC, 2010.

189 p.: il., grafs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Sistemas de energia elétrica. 3. Inversores elétricos. 4. Qualidade de energia. I. Rütther, Ricardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624





*À minha esposa Marilene e meus  
filhos Isabela e Gustavo, vocês  
tornam meus dias mais felizes.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, que torna tudo possível.

À toda minha família, que sempre me apoiou ao longo da minha carreira acadêmica e profissional.

Ao professor Ricardo Rütther, meu orientador, que com muito entusiasmo, luta pela implantação da energia solar fotovoltaica no Brasil.

Aos professores membros da banca, pelas contribuições no aprimoramento da versão final da tese.

Aos colegas e amigos do LabEEE e LABSOLAR: Alexandre, Clarissa, Danilo, Isabel, Ísis, Junior, Lucas, Marília, Paulo, Priscila e Trajano.

Contribuíram de forma marcante no desenvolvimento dessa tese, Marília e Priscila, a vocês, minha profunda gratidão.

Aos amigos da UTFPR do departamento acadêmico de eletrotécnica em Curitiba, pelo apoio recebido.

## RESUMO

Este trabalho aborda a interação entre os inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) e a qualidade da energia elétrica. Os inversores, ao entregarem energia à rede, injetam uma forma de onda de corrente que teoricamente deveria ser puramente senoidal, mas, dependendo do inversor e do percentual de potência que está sendo processado em relação a 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 à 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) desenvolveu e implantou desde 1997, um sistema de 14,69 kWp 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. Este fato motivou uma investigação mais profunda sobre a interrelação entre a qualidade da energia elétrica e o desempenho de inversores de SFCR. O baixo grau de exigência quanto às características técnicas em aparelhos eletro-eletrônicos em operação no Brasil contribui para que a qualidade de energia elétrica seja prejudicada. Baixo fator de potência, elevado conteúdo harmônico, elevada interferência eletromagnética (irradiada e/ou conduzida) são fatores que afetam significativamente a qualidade da energia elétrica no Brasil, diferente do que ocorre em países europeus onde normas rigorosas são impostas aos aparelhos eletro-eletrônicos em uso nestas localidades, permitindo um bom desempenho da rede elétrica. Este estudo apresenta a necessidade de se conhecer a qualidade da energia no ponto onde se deseja fazer a conexão de um sistema fotovoltaico, visto que isto passa a ser mais um quesito a ser considerado durante o anteprojeto de um SFCR. Por outro lado, após a implantação de um gerador fotovoltaico, dependendo da magnitude desta instalação, a sua influência sobre os parâmetros de qualidade da energia elétrica da rede pública também deverá ser considerada. O

método adotado nessa tese de verificar a qualidade da energia no ponto de conexão, de forma amostral, com o uso de um osciloscópio, mostrou-se adequado. Ainda no âmbito dessa tese, foi analisada a capacidade de conexão dos inversores em redes elétricas formadas a partir de geradores a diesel de médio e grande porte, e também de gerador a gasolina de pequeno porte. Os resultados mostraram que a entrada em operação dos inversores de SFGR eleva a tensão e quase sempre provoca leve redução no conteúdo harmônico da tensão, levando a uma leve melhoria na qualidade da energia na grande maioria das medições realizadas. Observou-se nos ensaios realizados uma melhora na qualidade de energia no ponto de conexão dos sistemas fotovoltaicos. Verificaram-se também casos em que a baixa qualidade de energia da rede inviabilizou o funcionamento dos SFGR ou prejudicou seu desempenho, requerendo outras ações para viabilizar o funcionamento do SFGR. Buscar identificar fatores que possam vir a afetar o desempenho de SFGR no Brasil, bem como antecipar-se a esses fatores propondo soluções tecnológicas que permitam a conexão, é uma forma de contribuir para que o Brasil possa ingressar nesta forma de geração de energia com maiores perspectivas de sucesso.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede; Qualidade de Energia; Inversores.



## ABSTRACT

This work discusses the interaction between the inverters of grid connected PV systems and the resulting power quality. When inverters deliver energy to the grid, they inject a waveform which theoretically should be purely sinusoidal, but depending on the inverter and the percentage of power being processed in relation to its rated output, this current presents certain degree of distortion. On the other hand, the low voltage network must possess a degree of power quality to allow the operation of inverters. These inverters monitor the network so that they only provide energy if the grid is present and with its default characteristics. Because of the low quantity of grid connected PV systems operating in Brazil, and because a large fraction of these systems are installed at universities and research centers, few problems related to power quality are reported. In these environments, different from the industrial environment, there is less tendency of the electrical energy to present high harmonic content. Among the grid connected PV systems projects that LABSOLAR at University Federal of Santa Catarina (UFSC) developed and deployed since 1997, a system of 14.69 kWp installed in 2008 in a metallurgical industry in São Bernardo do Campo - SP, presented connection problems due to low power quality of the grid at the interconnection point. This fact led to an investigation of the interrelation between power quality and the inverters performance of the grid connected PV systems. The low level of technical characteristics requirement for electronic devices in operation in Brazil contributes to a low power quality. Low power factor, high harmonic content, high radiated electromagnetic interference (irradiated and/or conducted) are factors that affect significantly the power quality in Brazil, unlike in European countries where strict standards are imposed to equipments used in these localities, allowing a good network performance. This study presents the need to know the power quality at the point where the connection of a PV system will be done, since this is one more aspect to be considered during the provisional draft of a grid connected PV system. On the other hand, after the connection of the PV generator, depending on the size of the installation, its influence on the power quality should also be considered. The method adopted in this thesis, to verify the power quality at the point of connection, using samples and an oscilloscope, was adequate. The connection capacity of the inverters in electrical grids formed from medium and large diesel generators, and also small gasoline generator was analyzed. The results showed that the operation of inverters SFCR elevates the tension and

almost always causes a slight reduction in the harmonic content of voltage, leading to a slight improvement in power quality in the vast majority of measurements taken. It was observed that 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 network either resulted in a reduced PV system performance, or altogether made impossible the operation of the grid connected PV system. To identify factors that may affect the performance of grid connected PV systems in Brazil, as well as to anticipate these factors and proposing technology solutions that allow the connection, is a way to contribute to the integration of this distributed, clean and renewable power generation source with greater prospects of success.

**Keywords:** Grid connected PV Systems; Power Quality; Inverters.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ilustração da grade metálica em uma célula FV.....	36
<b>Figura 2:</b> Vista da célula, módulo e painel fotovoltaico. ....	36
<b>Figura 3:</b> Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	37
<b>Figura 4:</b> Capacidade mundial acumulada de sistemas FV.....	39
<b>Figura 5:</b> Vista geral do prédio do departamento de engenharia mecânica da UFSC, na cobertura do qual foi instalado o SFCR de 2,02 kWp do LABSOLAR.....	42
<b>Figura 6:</b> Vista dos módulos e inversor SB2500 do SFCR de 2,02 kWp do LABSOLAR / UFSC. ....	43
<b>Figura 7:</b> Vista geral do Centro de Convivência / UFSC, no qual foi instalado um SFCR de 1,15 kWp.....	44
<b>Figura 8:</b> Vista dos módulos UNISOLAR US-64 do SFCR de 1,15 kWp do Centro de Convivência da UFSC.....	44
<b>Figura 9:</b> Vista do prédio da administração do IEE – USP, no qual o SFCR de 12,3 kWp foi instalado em 2001 e ampliado em 2003. ....	45
<b>Figura 10:</b> Vista dos inversores do SFCR de 12,3 kWp do LSF – IEE - USP.....	45
<b>Figura 11:</b> Vista geral do prédio do CEPEL, no qual o SFCR de 16,32 kWp foi instalado.....	46
<b>Figura 12:</b> Vista dos módulos BP580F e inversores SWR2500U do SFCR de 16,32 kWp do CEPEL. ....	46
<b>Figura 13:</b> Vista geral do prédio da IEM no qual o SFCR de 3 kWp foi instalado.....	47
<b>Figura 14:</b> Vista dos módulos do SFCR de 3 kWp da IEM. ....	47
<b>Figura 15:</b> Vista dos inversores do SFCR de 3 kWp da IEM. ....	48
<b>Figura 16:</b> Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Florianópolis.....	49
<b>Figura 17:</b> Vista dos inversores WÜRTH utilizados no SFCR de 1,41 kWp da CELESC em Florianópolis.....	49
<b>Figura 18:</b> Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Lages.....	50
<b>Figura 19:</b> Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Tubarão.....	51
<b>Figura 20:</b> Vista geral do prédio do Centro de Cultura e Eventos da UFSC no qual foi instalado o SFCR de 10,24 kWp.....	52
<b>Figura 21:</b> Vistas dos módulos FV e dos inversores utilizados no SFCR do Centro de Cultura e Eventos da UFSC.....	52
<b>Figura 22:</b> Vista geral do prédio do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, no qual foi instalado o SFCR de 4,8 kWp.....	53

<b>Figura 23:</b> Vista do quadro de conexões e dos inversores utilizados no SFCR de 4,8 kWp da UFRGS. ....	53
<b>Figura 24:</b> Vista geral do SFCR de 3 kWp do LSF-IEE / USP. ....	54
<b>Figura 25:</b> Vista dos inversores SB1100U utilizados no SFCR de 3 kWp do LSF – IEE / USP. ....	54
<b>Figura 26:</b> Vista geral do SFCR de 3,15 kWp do Laboratório de Sementes da CEMIG. ....	55
<b>Figura 27:</b> Vista dos inversores SB1100 do SFCR de 3,15 kWp do Laboratório de Sementes da CEMIG. ....	55
<b>Figura 28:</b> Vista geral do SFCR de 1,28 kWp da UFPE. ....	56
<b>Figura 29:</b> Vista do inversor de 1,1 kW do SFCR de 1,28 kWp da UFPE. ....	56
<b>Figura 30:</b> Vista geral dos módulos e dos inversores do SFCR de 2,25 kWp da Casa Eficiente / ELETROSUL. ....	57
<b>Figura 31:</b> Vista geral dos painéis FV e dos inversores do SFCR de 7,5 kWp da UNICAMP. ....	58
<b>Figura 32:</b> Vista geral do arranjo FV de 2,9 kWp do GREENPEACE. ....	59
<b>Figura 33:</b> Inversor XANTREX modelo GT-3.0 do SFCR de 2,9 kWp do GREENPEACE. ....	59
<b>Figura 34:</b> Vista geral do sistema FV de 1,5 kWp do Restaurante Lampião, em Piranhas - AL. ....	60
<b>Figura 35:</b> Vista inferior do painel FV do SFCR do CEFET-MG. ....	60
<b>Figura 36:</b> Vista geral do painel FV do sistema de 1,58 kWp do GEDAE / UFPA. ....	61
<b>Figura 37:</b> Inversor SOLETE 2500 utilizado no SFCR de 1,58 kWp do GEDAE / UFPA. ....	61
<b>Figura 38:</b> Parte dos módulos FV do SFCR de 2,87 kWp de uma residência em São Paulo - SP. ....	62
<b>Figura 39:</b> Inversor XANTREX utilizado no SFCR de 2,87 kWp de uma residência em São Paulo - SP. ....	62
<b>Figura 40:</b> Painel FV de 1,04 kWp do SFCR da empresa SOLARIS em Leme – SP. ....	63
<b>Figura 41:</b> Inversor e WebBox do SFCR de 1,04 kWp da empresa SOLARIS, em Leme - SP. ....	63
<b>Figura 42:</b> Vista geral do painel FV do sistema de 2,45 kWp da Motor Z. ....	64
<b>Figura 43:</b> Vista dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z. ....	65
<b>Figura 44:</b> Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados via RS485 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z. ....	65

<b>Figura 45:</b> Acesso ao portal da SMA e Sunny WebBox do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.....	66
<b>Figura 46:</b> Vistas do painel FV do sistema de 14,69 kWp da Fundação Estrela. ....	66
<b>Figura 47:</b> Vista com os inversores SMC6000A e SB2500 do SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela. ....	67
<b>Figura 48:</b> Diagrama representativo do sistema SMA de aquisição de dados via rádio, utilizado no SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela. ....	68
<b>Figura 49:</b> Sunny Beam utilizado no SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela. ....	68
<b>Figura 50:</b> Vista geral do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL. ....	69
<b>Figura 51:</b> Vista dos inversores SB4000US do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL.....	69
<b>Figura 52:</b> Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL.....	70
<b>Figura 53:</b> Vista geral do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC. ....	71
<b>Figura 54:</b> Vista da parte interna da caixa de conexões do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com o inversor SB2500 na parte superior.....	71
<b>Figura 55:</b> Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC. ....	72
<b>Figura 56:</b> Vista geral do sistema FV de 1,99 kWp do Hospital Universitário / TRACTEBEL / UFSC. ....	73
<b>Figura 57:</b> Vista da parte interna da caixa de conexões do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário na UFSC, com o inversor SB2500 na parte superior.....	73
<b>Figura 58:</b> Vista geral do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis. ....	74
<b>Figura 59:</b> Vista do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis.....	75
<b>Figura 60:</b> Vista do posto BR no Rio de Janeiro com o painel FV de 1,12 kWp em sua cobertura. ....	76
<b>Figura 61:</b> Inversor SB1100, caixa de conexões e medidor de energia utilizados no SFCR de 1,12 kWp no posto BR do Rio de Janeiro - RJ.....	76
<b>Figura 62:</b> Painel FV do SFCR de 3,12 kWp da COELBA, em Salvador - BA. ....	77

<b>Figura 63:</b> Vista do painel FV de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca em Palhoça - SC. ....	77
<b>Figura 64:</b> Vista do inversor SMC6000A e do medidor de energia do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca, em Palhoça - SC. ....	78
<b>Figura 65:</b> – Vista do SFCR FV de 3,3 kWp da UFPE, em Recife - PE. ....	78
<b>Figura 66:</b> Diagrama esquemático do sistema híbrido FV-diesel da vila de Araras, em Rondônia. ....	80
<b>Figura 67:</b> Vista do gerador FV de 20,48 kWp instalado na vila de Araras, em Rondônia. ....	80
<b>Figura 68:</b> Vista dos inversores WÜRTH utilizados no sistema híbrido FV-diesel da vila de Araras, em Rondônia. ....	81
<b>Figura 69:</b> Painel FV de 2,4 kWp instalado em Fernando de Noronha - PE. ....	81
<b>Figura 70:</b> Configurações de SFCR: a) inversor central; b) inversor por <i>string</i> ; c) inversor <i>multi-string</i> ; d) módulo CA. ....	83
<b>Figura 71:</b> Inversor com transformador de baixa frequência. ....	85
<b>Figura 72:</b> Inversor sem transformador. ....	86
<b>Figura 73:</b> Inversor sem transformador e <i>multi-string</i> . ....	86
<b>Figura 74:</b> Inversor com transformador de alta frequência. ....	86
<b>Figura 75:</b> Curvas de eficiência do inversor SMA com transformador de baixa frequência modelo SB3000. ....	87
<b>Figura 76:</b> Curvas de eficiência do inversor SMA sem transformador modelo SB5000TL. ....	88
<b>Figura 77:</b> Inversor de SFCR com o lado CC flutuando em relação ao terra. ....	89
<b>Figura 78:</b> Tensão no lado CC, sem e com aterramento. ....	90
<b>Figura 79:</b> Irradiação anual (kWh/m <sup>2</sup> ) para a cidade de Florianópolis. ....	95
<b>Figura 80:</b> Tipos de edificações solares. ....	96
<b>Figura 81:</b> Diagrama representativo dos ensaios realizados em laboratório. ....	100
<b>Figura 82:</b> Bancada construída para ensaios em laboratório. ....	101
<b>Figura 83:</b> Fonte SUPPLIER conectada ao inversor SB2500 e cargas. ....	102
<b>Figura 84:</b> Fonte SUPPLIER fornecendo: (a) onda senoidal, (b) fundamental mais terceiro harmônico e (c) fundamental mais quinto harmônico. ....	103
<b>Figura 85:</b> Localização dos painéis FV da Fundação Estrela (14,69 kWp) e da Motor Z (2,45 kWp). ....	105

<b>Figura 86:</b> Tensão e corrente fornecidas pelo inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC com 35% da potência nominal. ....	110
<b>Figura 87:</b> Conteúdo harmônico da corrente do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC com 35% da potência nominal. ....	110
<b>Figura 88:</b> Corrente na rede (A - preto), e do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), sem carga na bancada de testes.....	111
<b>Figura 89:</b> Corrente na rede (A - preto), do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), e na carga (C - azul). ....	111
<b>Figura 90:</b> Corrente da rede (A - preto), do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), na carga (C - azul). ....	112
<b>Figura 91:</b> Corrente da rede elétrica e na carga, com geração FV nula, no SFCR LABSOLAR / UFSC.....	113
<b>Figura 92:</b> Tensão e corrente em uma carga não linear.....	114
<b>Figura 93:</b> Tensão e corrente entregues à rede pelo inversor WÜRTH alimentando uma carga não linear. ....	114
<b>Figura 94:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC com 50% de carregamento.....	116
<b>Figura 95:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no SFCR LABSOLAR / UFSC.....	116
<b>Figura 96:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC com 50% de carregamento. ....	116
<b>Figura 97:</b> Tensão no ponto de conexão no LABSOLAR sem a geração FV. ....	117
<b>Figura 98:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, no SFCR LABSOLAR / UFSC.....	118
<b>Figura 99</b> – Corrente na saída do inversor SB2500 em operação no SFCR LABSOLAR / UFSC com monitoramento da impedância da rede. ....	119
<b>Figura 100</b> – Detalhe do pulso na corrente de saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC para monitoramento da impedância da rede.....	119
<b>Figura 101:</b> Corrente na saída do inversor SB2500 em operação no SFCR LABSOLAR / UFSC sem monitoramento da impedância da rede. ....	120
<b>Figura 102:</b> Detalhe da corrente de saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC sem o monitoramento da impedância da rede. ....	120

<b>Figura 103:</b> Tensão e corrente na saída do gerador a gasolina de 3 kVA alimentando uma carga resistiva de 1kW em ensaio de laboratório. ....	121
<b>Figura 104:</b> Componentes harmônicos da tensão entregue pelo gerador a gasolina de 3 kVA em ensaio de laboratório. ....	122
<b>Figura 105:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do gerador a gasolina de 3 kVA em ensaio de laboratório. ....	122
<b>Figura 106:</b> Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do gerador a gasolina com o inversor SB2500 operando.....	123
<b>Figura 107:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, com o gerador a gasolina e o inversor SB2500 operando.....	124
<b>Figura 108:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do gerador a gasolina com o inversor SB2500 operando. ....	124
<b>Figura 109:</b> Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 40% de carregamento.....	125
<b>Figura 110:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500. ....	125
<b>Figura 111:</b> Tensão no ponto de conexão e corrente na carga resistiva de 2.400 W, para uma rede formada pelo gerador a gasolina e pelo inversor SB2500. ....	126
<b>Figura 112:</b> Componentes harmônicos da corrente na carga resistiva de 2.400 W, para uma rede formada pelo gerador a gasolina e pelo inversor SB2500. ....	126
<b>Figura 113:</b> Tensão e corrente na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.....	127
<b>Figura 114:</b> Componentes harmônicos da tensão na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.....	127
<b>Figura 115:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.....	128
<b>Figura 116:</b> Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 25% de carregamento.....	129
<b>Figura 117:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão com a fonte CA e o inversor SB2500 operando. ....	129
<b>Figura 118:</b> Tensão (fundamental, 3º, 5º e 7º harmônicos) e corrente na saída da fonte CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, sem o gerador FV.....	130
<b>Figura 119:</b> Componentes harmônicos da tensão na saída da fonte CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, sem o gerador FV..	130
<b>Figura 120:</b> Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 65% de carregamento.....	131



<b>Figura 121:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, com o gerador FV.	131
<b>Figura 122 –</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W do gerador FV de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC. ....	132
<b>Figura 123:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC.....	133
<b>Figura 124:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor do SFCR de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC.....	133
<b>Figura 125 –</b> Tensão no ponto de conexão no Centro de Convivência da UFSC, sem o gerador FV.....	134
<b>Figura 126:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, no Centro de Convivência da UFSC. ....	134
<b>Figura 127:</b> Tensão e corrente na saída do inversor WÜRTH 1.500 W do Centro de Eventos da UFSC com carregamento de 65%.....	135
<b>Figura 128:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase A, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor WÜRTH 1.500 W operando.....	135
<b>Figura 129:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH 1.500 W conectado na fase A, do Centro de Eventos da UFSC. ....	136
<b>Figura 130:</b> Tensão e corrente na saída do inversor WÜRTH 1.200 W do Centro de Eventos da UFSC com carregamento de 75%.....	136
<b>Figura 131:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase B, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor WÜRTH 1.200 W operando.....	137
<b>Figura 132:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH 1.200 W conectado na fase B, do Centro de Eventos da UFSC. ....	137
<b>Figura 133:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do Centro de Eventos da UFSC com 100% de carregamento.....	138
<b>Figura 134:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase C, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor SB2500 operando.....	138
<b>Figura 135:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 conectado na fase C, do Centro de Eventos da UFSC.....	139
<b>Figura 136:</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W da CELESC (sede) / UFSC com 90% de carregamento.	139
<b>Figura 137:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão da CELESC / UFSC com o inversor WÜRTH de 650 W operando. ....	140

<b>Figura 138:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH de 650 W da CELESC / UFSC. ....	140
<b>Figura 139:</b> Tensão no ponto de conexão na CELESC / UFSC, sem o gerador FV.....	141
<b>Figura 140:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, na CELESC / UFSC.....	141
<b>Figura 141:</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 1.500 W da Casa Eficiente com 60% de carregamento. ....	142
<b>Figura 142:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão da Casa Eficiente com o inversor WÜRTH de 1.500 W operando. ....	142
<b>Figura 143:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH de 1.500 W da Casa Eficiente. ....	143
<b>Figura 144:</b> Tensão no ponto de conexão na Casa Eficiente, sem o gerador FV.....	143
<b>Figura 145:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, na Casa Eficiente.....	144
<b>Figura 146:</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores SB4000US do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, com 90% de carregamento. ....	144
<b>Figura 147:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, com o inversor SB4000U operando.....	145
<b>Figura 148:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores SB4000U do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis. ....	145
<b>Figura 149:</b> Tensão no ponto de conexão da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, sem o gerador FV. ....	146
<b>Figura 150:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, na ELETROSUL / UFSC.....	146
<b>Figura 151:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com 65% de carregamento. ....	147
<b>Figura 152:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com o inversor SB2500 operando. ....	147
<b>Figura 153:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC. ....	148
<b>Figura 154:</b> Tensão no ponto de conexão do Colégio de Aplicação da UFSC, sem o gerador FV. ....	148

<b>Figura 155:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Colégio de Aplicação da UFSC....	148
<b>Figura 156:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário com 70% de carregamento. ....	149
<b>Figura 157:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário, com o inversor SB2500 operando.....	149
<b>Figura 158:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário. ....	150
<b>Figura 159:</b> Tensão no ponto de conexão do Hospital Universitário da UFSC, sem o gerador FV.....	150
<b>Figura 160:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Hospital Universitário da UFSC...	151
<b>Figura 161:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, com 65% de carregamento. ....	152
<b>Figura 162:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, com o inversor SB2500 operando.....	152
<b>Figura 163:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis. ....	152
<b>Figura 164:</b> Tensão no ponto de conexão no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, sem o gerador FV. ....	153
<b>Figura 165:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis.....	153
<b>Figura 166:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca com 30% de carregamento.....	155
<b>Figura 167:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca, com o inversor SMC6000A operando. ....	155
<b>Figura 168:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca.	156
<b>Figura 169:</b> Tensão no ponto de conexão do Condomínio Pedra Branca, sem o gerador FV.....	156
<b>Figura 170:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Condomínio Pedra Branca.....	157

<b>Figura 171:</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, com 70% de carregamento. ..	157
<b>Figura 172:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, com o inversor SB1100 operando. ....	158
<b>Figura 173:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.....	158
<b>Figura 174:</b> Tensão no ponto de conexão do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, sem o gerador FV. ....	159
<b>Figura 175:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, na Motor Z. ....	159
<b>Figura 176:</b> Tensão $V_{AB}$ e corrente $I_A$ medidos no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela. ....	160
<b>Figura 177:</b> Componentes harmônicos da tensão $V_{AB}$ no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela. ....	160
<b>Figura 178:</b> Componentes harmônicos da corrente $I_A$ no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela. ....	161
<b>Figura 179:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp com carregamento de 15%, e conectado ao quadro 1 da Fundação Estrela após a alteração de seus parâmetros. ....	163
<b>Figura 180:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão (quadro 1) na Fundação Estrela, com o gerador FV de 14,69 kWp. ....	163
<b>Figura 181:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp (conectado ao quadro 1) da Fundação Estrela. ....	163
<b>Figura 182:</b> Tensão $V_{AB}$ e corrente $I_A$ medidos no quadro elétrico 2 da Fundação Estrela. ....	164
<b>Figura 183:</b> Componentes harmônicos da tensão $V_{AB}$ no quadro elétrico 2 da Fundação Estrela. ....	165
<b>Figura 184:</b> Componentes harmônicos da corrente $I_A$ no quadro elétrico 2 da Fundação Estrela. ....	165
<b>Figura 185:</b> Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp com carregamento de 35%, conectado ao quadro 2 da Fundação Estrela. ....	166
<b>Figura 186:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão (quadro 2) na Fundação Estrela, com o gerador FV de 14,69 kWp. ....	166

<b>Figura 187:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A (conectado ao quadro 2) do SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela. ....	167
<b>Figura 188:</b> Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W do gerador FV de 20,48 kWp em Araras, com carregamento de 45%.....	168
<b>Figura 189:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão em Araras, com o gerador FV de 20,48 kWp. ....	169
<b>Figura 190:</b> Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W pertencente ao gerador FV de 20,48 kWp em Araras. ....	169
<b>Figura 191:</b> Tensão no ponto de conexão em Araras - RO, sem o gerador FV. ....	170
<b>Figura 192:</b> Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, em Araras - RO.....	170

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> SFCR em operação no Brasil. ....	41
<b>Tabela 2:</b> Limites de distorção na corrente. ....	93
<b>Tabela 3:</b> Características elétricas do inversor SMA modelo SB2500. ....	99
<b>Tabela 4:</b> SFCR utilizados nos ensaios de campo. ....	104
<b>Tabela 5:</b> Amostra dos valores de THD <sub>v</sub> (%), com e sem FV para o SFCR da LABSOLAR / UFSC que utiliza o inversor SB2500. ....	106
<b>Tabela 6:</b> Valores atribuídos aos parâmetros de operação dos inversores SMA da Fundação Estrela (no quadro elétrico 1). ....	164
<b>Tabela 7:</b> Valores atribuídos aos parâmetros de operação dos inversores SMA da Fundação Estrela (no quadro elétrico 2) e da Motor Z. ...	167

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;  
ARC – *anti-reflective coating* (camada antirreflexiva);  
a-Si – silício amorfo;  
CA – corrente alternada;  
CC – corrente contínua;  
CdTe – telureto de cádmio;  
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina;  
CELPE – Companhia Energética de Pernambuco;  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica;  
CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco;  
CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz;  
CSI – *current source inverter* (inversor fonte de corrente);  
c-Si – silício cristalino;  
FET – *field effect transistor* (transistor de efeito de campo);  
FV – fotovoltaico;  
GD – geração distribuída;  
 $G_{CS}$  – constante solar;  
IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia;  
IGBT – *insulated gate bipolar transistor* (transistor bipolar de gatilho isolado);  
LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações;  
LABSOLAR – Laboratório de Energia Solar;  
LF – *low frequency* (baixa frequência);  
LSF – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos;  
MPP – *maximum power point* (ponto de máxima potência);  
m-Si – silício multicristalino;  
PLL – *phase locked loop*;  
PWM – *pulse width modulation* (modulação por largura de pulso);  
SFCR – sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica;  
SFI – sistema fotovoltaico isolado;  
SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment*;  
TBJ – transistor bipolar de junção;  
TCO – *transparent conductive oxide* (óxido transparente condutivo);  
THD – *total harmonic distortion* (distorção harmônica total);  
THDi – distorção harmônica total da corrente elétrica;  
THDv – distorção harmônica total da tensão elétrica;  
T&D – transmissão e distribuição;  
 $\mu$ -Si – silício microcristalino;  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;  
UNICAMP – Universidade de Campinas;  
USB – *universal serial bus* (barramento serial universal);  
USP – Universidade de São Paulo;  
VSI – *voltage source inverter* (inversor fonte de tensão);  
ZVS – *zero voltage switching* (chaveamento com tensão zero).



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
1.1	TEMA .....	30
1.1.1	Delimitação do tema.....	30
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	30
1.2.1	Problematização .....	30
1.2.2	O Problema em Questão:.....	31
1.3	HIPÓTESE.....	31
1.4	OBJETIVOS .....	31
1.4.1	Geral.....	31
1.4.2	Específicos.....	32
1.5	JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	32
<b>2</b>	<b>ESTADO ATUAL DA ENERGIA SOLAR FV CONECTADA À REDE ELÉTRICA, NO MUNDO E NO BRASIL.....</b>	<b>35</b>
2.1	ENERGIA SOLAR PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE.....	35
2.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA (SFCRs).....	37
2.2.1	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil .....	40
2.2.2	Minirrede híbrida FV-diesel no Brasil.....	79
<b>3</b>	<b>INVERSORES DE SFCR, A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E A INTEGRAÇÃO AO AMBIENTE CONSTRUÍDO.....</b>	<b>82</b>
3.1	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....	91
3.1.1	Inversores utilizados em sistemas FV e a qualidade da energia elétrica.....	93
3.2	INTEGRAÇÃO DE GERADORES SOLARES AO AMBIENTE CONSTRUÍDO.....	93
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>97</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	97
4.2	PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS EM LABORATÓRIO.....	99
4.3	PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS EM SFCR EM OPERAÇÃO.....	103
4.4	MÉTODO ESTATÍSTICO PARA DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA.....	105

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>109</b>
5.1	ENSAIOS PRELIMINARES NO SFCR DO LABSOLAR / UFSC .....	109
5.2	ENSAIOS NO SFCR DO LABSOLAR / UFSC COM O INVERSOR SB2500 .....	115
5.2.1	Ensaio relativo aos pulsos para medição da impedância da rede.....	118
5.2.2	Ensaio em laboratório com um gerador a gasolina de 3 kVA.....	120
5.2.3	Ensaio em laboratório com a fonte CA programável.....	126
5.3	ENSAIOS NOS DEMAIS SFCR EM FLORIANÓPOLIS .....	132
5.3.1	Centro de Convivência / UFSC / 1,1 kWp .....	132
5.3.2	Centro de Cultura e Eventos / UFSC / 10,24 kWp.....	134
5.3.3	CELESC (sede) / UFSC / 1,4 kWp .....	139
5.3.4	Casa Eficiente / ELETROSUL / UFSC / 2,25 kWp.....	141
5.3.5	ELETROSUL (sede) / UFSC / 11,97 kWp .....	144
5.3.6	Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC / 1,99 kWp.....	146
5.3.7	Hospital Universitário / TRACTEBEL / UFSC / 1,99 kWp.....	149
5.3.8	Aeroporto Hercílio Luz / TRACTEBEL / UFSC / 2,12 kWp.....	151
5.3.9	Condomínio Pedra Branca / UFSC / 6,4 kWp;.....	154
5.4	ENSAIOS NOS INVERSORES DO GRUPO ZEPPINI - ESTUDO DE CASO .....	157
5.4.1	Motor Z / Grupo Zeppini / 2,45 kWp.....	157
5.4.2	Fundição Estrela / Grupo Zeppini / 14,69 kWp .....	159
5.5	ENSAIOS NOS INVERSORES DO SISTEMA HÍBRIDO FV-DIESEL .....	168
5.5.1	Araras (Nova Mamoré – RO) / Híbrido FV-diesel / 20,48 kWp.....	168
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>171</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>177</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>185</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>187</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica no Brasil é gerada predominantemente a partir de usinas hidrelétricas, uma das fontes de geração de mais baixo custo, mas de impactos ambientais consideráveis, devido à necessidade da formação de grandes reservatórios de água para movimentar as turbinas dos geradores. Em menor escala no país, outras formas de geração de energia elétrica são utilizadas: usinas térmicas, nucleares e eólicas.

As usinas térmicas utilizam-se da queima de combustíveis (derivados de petróleo / gás natural / carvão mineral e biomassa) para a geração de energia elétrica. O grau de poluição está relacionado ao tipo e quantidade de combustível empregado no processo.

As usinas nucleares são motivo de discussão em qualquer lugar do mundo, devido ao fato de que se houver um acidente, as consequências serão desastrosas para o homem e para o meio ambiente, além do problema de descarte do material radioativo após seu esgotamento energético e também porque o custo dessa forma de geração não é tão baixo como originalmente previsto (PATTERSON, 2007).

As usinas eólicas começam a surgir no Brasil como uma opção interessante. Atualmente, as usinas eólicas de maior porte estão localizadas nas regiões sul, sudeste e nordeste do país, sendo que o maior projeto eólico brasileiro está localizado em Osório, no Rio Grande do Sul. As potências instaladas somam, no entanto, menos de 1.000 MW até o presente.

Os processos de geração de energia elétrica citados referem-se à geração em larga escala, cujo objetivo é atender principalmente os centros urbanos e os pólos industriais.

Visando descongestionar os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, alguns países da Europa, como a Alemanha, tem incentivado a chamada geração distribuída, onde o próprio consumidor gera toda ou parte da energia que ele mesmo consome. Isto está sendo conseguido também através do uso de módulos fotovoltaicos, que convertem a energia do sol diretamente em energia elétrica. Desta forma, aumenta-se a disponibilidade de energia para o consumidor, sem a necessidade de que esta seja gerada a muitos quilômetros de onde será consumida, como ocorre normalmente.

A possibilidade de gerar energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos no entorno das edificações só tem a contribuir com a redução dos problemas inerentes às formas convencionais de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Uma vez que os custos

baixem a níveis competitivos em relação à geração convencional, esta fonte de geração deverá penetrar mais no mercado urbano.

Os sistemas fotovoltaicos possuem baixo impacto ambiental, produzem energia através de uma fonte renovável e de maneira silenciosa. Esta tecnologia, já utilizada em países desenvolvidos desde o início dos anos 80, pode ser amplamente aplicada no Brasil, um país ensolarado por natureza e de grande extensão territorial, onde a geração distribuída tem muito a contribuir.

Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde é grande o consumo da energia gerada de forma convencional, podendo ser instalados em edifícios, condomínios residenciais, casas isoladas, indústrias e comércios.

Cada vez mais se buscam soluções visando reduzir o nível de poluição associado ao uso da energia derivada dos combustíveis fósseis, bem como evitar a construção de novas usinas hidrelétricas de grande porte, devido ao impacto ambiental causado pelos seus gigantescos reservatórios. Nesse contexto, fontes alternativas de energia, em particular, a solar fotovoltaica, tem potencial para contribuir de forma significativa.

A possibilidade de integrar a geração ao ponto de consumo, sem a necessidade de área adicional, utilizando a própria cobertura da edificação ou a sua fachada, desde que harmonicamente combinada, permite minimizar as perdas de energia elétrica. No entanto, esse conceito de geração distribuída ainda é pouco discutido no Brasil.

O uso intensivo de energia produzida pela queima de combustíveis fósseis pela sociedade moderna tem sido apontado como fator determinante para a elevação de temperatura no planeta e, conseqüentemente, pelas alterações observadas na natureza. Essa elevação de temperatura deve-se principalmente ao aumento na concentração de gases do efeito estufa na atmosfera. Segundo Gore (2006), o professor Roger Revelle iniciou medições dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera em 1957 e o resultado foi sempre um padrão ascendente nas concentrações de CO<sub>2</sub>. Aliado a isso, a diminuição nas reservas de combustíveis fósseis, e o alto grau de poluição atribuído à utilização desta forma de energia, impulsionou a busca por alternativas de geração de energia de forma limpa e renovável.

Buscar o equilíbrio entre desenvolvimento e uso das formas de energia disponíveis, bem como aplicar técnicas de conservação de energia, passa a ser o desafio das nações desenvolvidas ou em processo de desenvolvimento.

De acordo com Geller (2003), “o modo com que o mundo produz e consome energia está proporcionando muitos impactos ambientais e sociais. Uma revolução na forma de produzir e consumir energia geraria muitos benefícios econômicos, ambientais e sociais. Essa revolução implica na melhora da eficiência energética e na substituição das fontes atuais por fontes renováveis. Um futuro mantendo os padrões atuais não é nem sustentável e nem desejável”.

Essas afirmações, embora óbvias, merecem ser repetidas para quem sabe em um futuro próximo, ações efetivas sejam tomadas para alterar esse quadro.

No Brasil, após a crise no sistema elétrico em 2001, ações relativas à eficiência energética foram iniciadas com a Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001), que estabelece padrões mínimos de desempenho energético. A partir desta data, evidenciou-se a necessidade de racionalizar o uso da energia elétrica utilizando dispositivos capazes de realizar a mesma tarefa com menor gasto energético, ou seja, mais eficientes.

Em paralelo às ações de eficiência energética, começam a surgir no país iniciativas de geração de energia elétrica de forma descentralizada, a partir dos sistemas fotovoltaicos. Esses sistemas fotovoltaicos, quando conectados à rede elétrica pública, utilizam a tensão elétrica da rede como referência para gerar a sua forma de onda (senoidal, com mesma amplitude, frequência e em fase). Uma vez que a energia disponibilizada pela rede elétrica serve de referência, padrões mínimos de qualidade de energia são requeridos pelo sistema de geração fotovoltaica, para permitir a sua conexão em paralelo ao sistema principal. A falta da tensão de referência, ou anormalidades presentes nessa tensão, pode provocar o desligamento do inversor do sistema fotovoltaico, impedindo a geração por meio dessa tecnologia.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) devem operar com elevado fator de utilização; ou seja, devem estar aptos a gerar energia elétrica sempre que houver irradiância solar incidindo sobre o arranjo fotovoltaico. Portanto, fatores que possam prejudicar a conexão devem ser conhecidos e superados.

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. Por outro lado, após a implantação de um gerador fotovoltaico, dependendo da magnitude da instalação, a sua influência sobre os parâmetros de qualidade da energia elétrica disponibilizada pela rede também deve ser considerada.

## 1.1 TEMA

A temática estudada nesta tese se refere à interação entre os parâmetros de qualidade de energia da rede elétrica e o funcionamento de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs).

### 1.1.1 Delimitação do tema

A presente tese de doutoramento é conduzida com base nos seguintes tópicos:

- Pesquisa aplicada a SFCRs no lado de baixa tensão, em algumas das instalações existentes no Brasil, com o objetivo de analisar a qualidade de energia no ponto de conexão;
- Estudo de caso desenvolvido em uma instalação fotovoltaica em São Bernardo do Campo - SP, onde os inversores rejeitaram a rede elétrica por baixa qualidade da energia da rede no ponto de conexão;
- Ensaios realizados em SFCRs em operação normal e em laboratório, que serviram de base para o levantamento de dados;
- Operação dos sistemas fotovoltaicos conectados em paralelo com grupos motor-gerador.

Esses tópicos balizaram o andamento da pesquisa na busca da interpretação da interação entre o funcionamento de inversores de SFCRs e a qualidade da energia elétrica no ponto de conexão.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

### 1.2.1 Problematização

Pressupondo a implantação em larga escala no Brasil de SFCRs, a interação entre esses sistemas e os parâmetros de qualidade de energia de rede elétrica deve ser conhecida.

Em Braun-Grabolle (2010), o efeito da inserção de grandes blocos de energia a partir de geradores fotovoltaicos foi discutido, principalmente em relação ao perfil da tensão no alimentador. Porém, quanto à distorção harmônica da tensão e da corrente no ponto de conexão, ainda existem lacunas a serem analisadas.

Nos SFCRs, anomalias na qualidade de energia da rede elétrica pública podem fazer com que o inversor rejeite a rede. Essa rejeição impede o funcionamento do inversor, não permitindo a geração fotovoltaica.

Pelo fato dos SFCRs em operação no Brasil estarem instalados quase na sua totalidade em universidades e centros de pesquisa, poucos problemas relativos à qualidade de energia são relatados.

À medida que novas instalações fotovoltaicas passem a entrar em operação, principalmente quando em ambiente industrial, conhecer a qualidade da energia no ponto de conexão passa a ser de vital importância. Assim, pode-se evitar que vultosos investimentos sejam realizados com os sistemas geradores fotovoltaicos e que os mesmos apresentem problemas no momento em que forem conectados à rede elétrica.

### 1.2.2 O Problema em Questão:

A falta de atendimento a certos parâmetros de qualidade da energia no ponto de conexão de SFCRs podem levar o inversor a rejeitar a rede elétrica, impedindo a geração de energia pelo sistema fotovoltaico.

## 1.3 HIPÓTESE

A expectativa de que geradores fotovoltaicos possam simplesmente e diretamente ser instalados em qualquer ponto de uma rede de distribuição secundária, não pode ser garantida. Porém, através de ações simples, é possível identificar e corrigir os parâmetros de qualidade de energia que interferem no funcionamento dos inversores de SFCRs.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Geral

Analisar a interação entre os parâmetros de qualidade de energia elétrica e o funcionamento dos inversores de SFCR, propondo soluções que permitam a conexão à rede.

### 1.4.2 Específicos

- Levantar os parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão dos inversores com a rede elétrica, em alguns dos SFCR em operação no Brasil;
- Levantar os parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão dos inversores com a rede elétrica, em um sistema fotovoltaico instalado em São Bernardo do Campo – SP, que rejeitou a rede;
- Realizar ensaios em laboratório visando identificar os parâmetros críticos que podem levar os inversores de SFCRs a rejeitarem a rede;
- Analisar os limiares desses parâmetros críticos que viabilizam ou impedem a operação normal dos inversores de SFCRs;
- Analisar o desempenho de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados, quando em uso junto a grupos motor-gerador;
- Propor soluções para permitir o funcionamento dos inversores de SFCRs.

### 1.5 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A irradiação solar é uma energia que está disponível e deve ser aproveitada de todas as formas possíveis. Entre estas formas de aproveitamento, a conversão da irradiação solar em energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos é uma das mais promissoras técnicas de geração de energia elétrica, devido às seguintes características:

- apresenta baixo impacto ambiental;
- é estática (sem peças móveis);
- é silenciosa;
- apresenta baixo índice de manutenção;
- apresenta alta confiabilidade;
- pode ser instalada junto ao ponto de consumo;
- é modular (fácil ampliação ou redução da quantidade de módulos);
- passa a gerar imediatamente após a instalação;
- apresenta baixo *payback* energético<sup>1</sup>;
- possibilita, se necessário, a reinstalação em outro local.

---

<sup>1</sup> *Payback* energético representa o tempo que o módulo fotovoltaico deve operar para gerar a mesma quantidade de energia gasta na sua fabricação.



Como fatores restritivos ao uso desta tecnologia têm-se:

- alto custo dos módulos fotovoltaicos;
- pequena (porém crescente) escala mundial de fabricação dos módulos fotovoltaicos;
- não opera a noite;
- desconhecimento do potencial de aplicação desta tecnologia.

A maioria destes fatores restritivos tornar-se-ão menos importantes à medida que cresça a aplicação, motivando cada vez mais a ampliação da capacidade de fabricação de módulos fotovoltaicos, com menores custos, maior eficiência e com menor *payback* energético.

Um dos papéis da pesquisa aplicada nesta área da ciência e tecnologia é difundir formas de utilização dos módulos fotovoltaicos, visando acelerar a redução das restrições ao uso dos sistemas fotovoltaicos. Portanto, a identificação de como e onde aplicá-los, superando as restrições atuais, é uma forma de colaborar neste processo.

Diferente de um trabalho de eletrônica de potência, onde o circuito eletrônico do inversor é o foco do estudo, esta tese aborda a aplicação de inversores de SFCR disponíveis no mercado internacional, operando nas condições brasileiras, com o intuito de ampliar as possibilidades de uso desses equipamentos no Brasil.

Atualmente, no mundo, a aplicação que mais cresce de sistemas fotovoltaicos é a utilização em sistemas conectados à rede elétrica. No Brasil, por ser ainda uma prática incipiente, poucos problemas relacionados com a qualidade de energia disponibilizada aos consumidores brasileiros são relatados. Porém, a supor que o Brasil avance nas aplicações desta tecnologia, existe a possibilidade de que instalações fotovoltaicas tornem-se inviáveis de entrar em operação, ou tenham sua operação dificultada pela baixa qualidade da energia da rede de distribuição no ponto de conexão.

Um fator que contribui para esta situação é o baixo grau de exigência quanto a características técnicas em aparelhos eletroeletrônicos em operação no Brasil. Baixo fator de potência, elevado conteúdo harmônico, elevada interferência eletromagnética (irradiada e/ou conduzida) são fatores que afetam significativamente a qualidade da energia elétrica no Brasil, diferente do que ocorre em certos países europeus, onde normas rigorosas são impostas aos aparelhos eletroeletrônicos em uso nestas localidades.

O mercado atual de inversores para SFCR no Brasil é totalmente dominado por equipamentos importados, não por falta de competência da indústria nacional, mas pela escala de mercado que ainda é muito baixa e não garante uma base sólida de vendas para assegurar o desenvolvimento de um novo produto comercial e competitivo. Assim, as instalações de SFCR utilizam os inversores desenvolvidos para países onde a qualidade da rede é, via de regra, melhor do que a brasileira.

A questão desconhecida, e que, entre outras informações, esta tese pretende elucidar, é até que ponto é possível, ampliando as tolerâncias especificadas nos inversores importados e sem ferir as condições de qualidade estabelecidas pela legislação, instalá-los e fazer uso dos mesmos para a operação dos SFCR no Brasil.

Buscar identificar fatores que possam vir a afetar o desempenho de SFCRs no Brasil, bem como antecipar-se a esses fatores e propor ações preventivas com base no conhecimento científico na área, são maneiras de contribuir para que o Brasil possa ingressar nessa forma de geração de energia com maiores perspectivas de sucesso.

## **2 ESTADO ATUAL DA ENERGIA SOLAR FV CONECTADA À REDE ELÉTRICA, NO MUNDO E NO BRASIL**

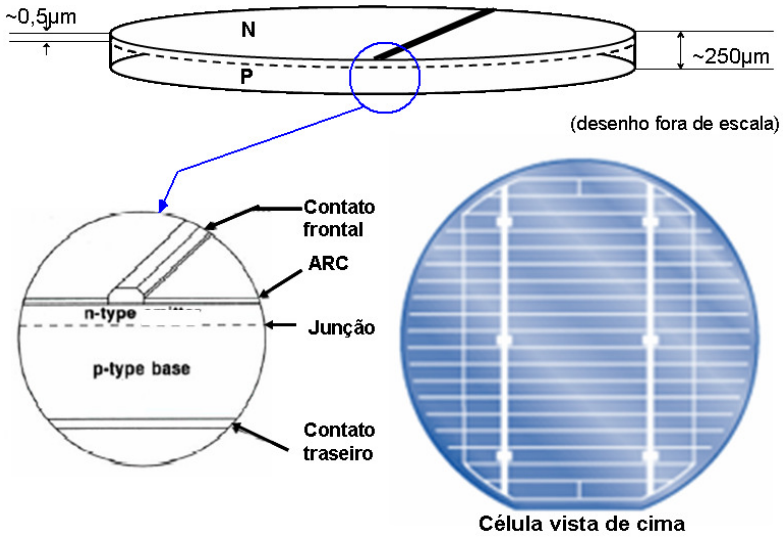
### **2.1 ENERGIA SOLAR PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE**

O Sol, distante aproximadamente 150 milhões de quilômetros da Terra, emite radiação que, ao atingir a camada externa da atmosfera terrestre possui uma intensidade de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , conhecida como constante solar ( $G_{CS}$ ) (DUFFIE e BECKMAN, 1991). Em aplicações espaciais de conversão da energia solar em energia elétrica com o uso de módulos fotovoltaicos (FV) toda essa energia pode estar disponível na superfície de dispositivos de conversão FV.

Em aplicações terrestres, com a propagação da radiação solar na atmosfera, ocorre o espalhamento e a absorção de parte dessa radiação (PEREIRA et al., 2006), resultando em uma irradiância de aproximadamente  $1.000 \text{ W/m}^2$  ao meio dia solar na superfície terrestre em dias sem nuvens, sendo esse valor considerado no dimensionamento de sistemas solares para a geração de eletricidade. A geração de energia elétrica, através da energia solar, pode ser obtida pelo aproveitamento térmico ou pelo efeito fotovoltaico.

A célula FV (ver Figura 1), parte elementar de um módulo FV, converte diretamente a luz do sol em eletricidade (efeito fotovoltaico). Essas células são associadas eletricamente em arranjos série/paralelo a fim de formar um módulo FV. Para gerar a energia requerida pela carga, módulos são associados (formando um painel FV) a fim de obter-se o nível de tensão e corrente desejados. A Figura 2 ilustra um painel FV. A geração FV é dada com o uso de módulos FV planos (mais comuns) ou com o uso de módulos FV concentradores (VIANA, 2010; VIANA et al., 2008), todos conectados a conversores estáticos que processam esta energia e a disponibilizam para uma carga ou para a rede elétrica.

Os materiais semicondutores mais comumente encontrados na constituição de células FV são: silício (Si) cristalino (c-Si), multicristalino (m-Si), amorfo (a-Si) e microcristalino ( $\mu$ -Si); telúrio (Te); cádmio (Cd); cobre (Cu); índio (I); gálio (Ga); selênio (Se), entre outros (RÜTHER, 2004b; 2006).

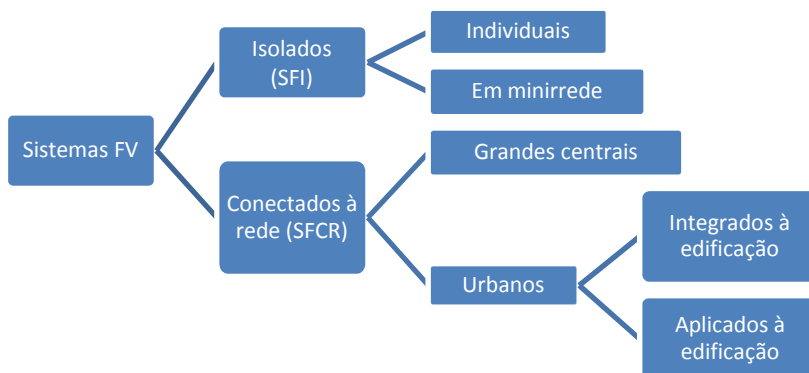


**Figura 1:** Ilustração da grade metálica em uma célula FV.



**Figura 2:** Vista da célula, módulo e painel fotovoltaico.

A eficiência das células de silício cristalino e multicristalino situa-se na faixa de 14 a 19% e as de filmes finos (de silício amorfo e outros materiais) apresentam eficiência na faixa de 6 a 18% (MAYCOCK e BRADFORD, 2007; VIANA *et al.*, 2008). A aplicação dos sistemas FV pode ser categorizada conforme a Figura 3.



**Figura 3:** Tipos de sistemas fotovoltaicos.

Os sistemas FV isolados (SFI) são normalmente instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e necessitam de um elemento armazenador de energia. Já os SFCRs são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar a energia próximo ao ponto de consumo.

## 2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA (SFCRs)

Os SFCRs são constituídos basicamente por: painel FV e inversor. Não são utilizados elementos para armazenar a energia elétrica. Basicamente, a rede elétrica da concessionária é vista como o elemento armazenador, pois toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede. As principais vantagens desse tipo de sistema são: a elevada produtividade (toda a energia disponibilizada pelos módulos é utilizada) e a ausência do conjunto de baterias (um elo frágil no SFI devido à baixa vida útil em relação a dos módulos FV e dos inversores). Outra característica desse sistema é que na ausência de

energia da rede, o inversor desliga o sistema automaticamente, evitando assim o fenômeno de ilhamento<sup>2</sup> (CULLEN *et al.*, 2002; DHERE, 2005; RÜTHER, 2004a; SANTOS *et al.*, 2008; ZEINELDIN *et al.*, 2007). Segundo Verhoeven (2002), a probabilidade de um gerador FV provocar o ilhamento em uma rede elétrica é praticamente nula, mesmo para pequenos, médios ou altos níveis de penetração de sistemas FV.

Os SFCRs representam uma forma de geração renovável de energia elétrica com grande crescimento mundial, inclusive a partir de 2004, superando os SFI. A potência total de SFCRs instalados pelo mundo passou dos 3,5 GWp em 2005 para 5,1 GWp no ano seguinte; 7,5 GWp em 2007, atingindo 13 GWp em 2008. Isso representa um crescimento anual superior a 40% até 2007 e de 70% entre 2007 e 2008 (REN21, 2009). Em 2009, o crescimento foi de 46% em relação ao ano anterior, atingindo 19 GWp. A estimativa é que, somente em 2010, sejam adicionados mais 8,4 GWp (DISPLAYBANK, 2010). A Associação da Indústria Fotovoltaica Europeia estima que em 2010 sejam adicionados entre 10 e 15 GWp, dependendo do cenário político (EPIA, 2010).

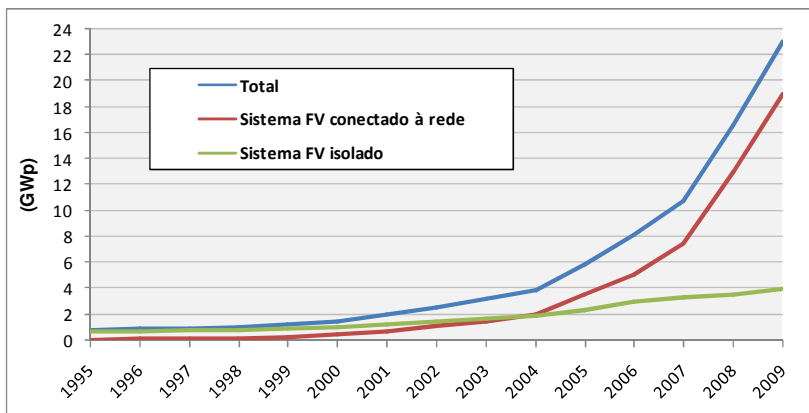
A produção anual de módulos FV também cresce em um ritmo acelerado: 1,8 GWp em 2005, 2,5 GWp no ano seguinte, 3,7 GWp em 2007 e 6,9 GWp em 2008 (REN21, 2009). Em 2009, a produção de módulos FV foi de 12,3 GWp (PHOTON-INTERNATIONAL, 2010d).

Os países com maior capacidade instalada até o fim de 2009 eram: Alemanha (8,7 GWp); Espanha (3,4 GWp); Japão (2,4 GWp) e Estados Unidos (1,2 GWp), e começaram a se destacar também a Itália (0,8 GWp) e a Coreia do Sul (0,5 GWp) (DISPLAYBANK, 2010; PHOTON-INTERNATIONAL, 2010a; 2010b; REN21, 2009).

Em 2009, somente a Alemanha adicionou 3,3 GWp em SFCR, mantendo um forte crescimento ano após ano (DISPLAYBANK, 2010). A Espanha praticamente não alterou sua capacidade instalada, adicionou apenas 100 MWp (PHOTON-INTERNATIONAL, 2010b). A Figura 4 mostra o crescimento acelerado nos últimos anos da capacidade instalada mundial dos SFCR e a situação até o fim de 2009.

---

<sup>2</sup> O fenômeno ilhamento ocorre quando parte da rede elétrica é desconectada propositalmente ou acidentalmente do restante do sistema da concessionária, mas essa continua a ser energizada por um ou mais geradores distribuídos conectados a ela, formando um subsistema isolado.



**Figura 4:** Capacidade mundial acumulada de sistemas FV.

Fonte: Adaptado de Displaybank (2010) e REN21(2009)

Todos os países que se destacam na aplicação desta tecnologia adotaram programas de incentivo, seja subsidiando a aquisição dos sistemas FV, remunerando atrativamente a energia fotogerada ou ambas as situações. Programas como o *One Thousand Rooftop* que na sequência passou para *Hundred Thousand Rooftop* na Alemanha (PERLIN, 1999) e o *Sunshine* no Japão (REN21, 2007) deram o impulso necessário à disseminação da tecnologia fotovoltaica nesses países. Na Espanha, em maio de 2007 foi criado o Real Decreto 661/2007, que estipulou tarifas entre 32 e 34 centavos de euro por kWh fotogerado. Isso fez com que apenas entre maio de 2007 e outubro de 2008 fossem instalados nesse país 3,13 GWp, o que levou o governo espanhol a rever sua política e, em setembro de 2008, instituir o Real Decreto 1578/2008, que estabeleceu um limite de 500 MWp/ano em novas instalações FV (SALAMONI, 2009).

No Japão e nos Estados Unidos, o sistema de tarifação é conhecido como *net metering*. A unidade consumidora acumula créditos (em kWh) quando injeta energia na rede da concessionária e esses créditos são utilizados pelo consumidor nos momentos de baixa ou nenhuma radiação solar. Na Alemanha e na Espanha, o sistema de tarifação *feed in tariff* prevê que a unidade consumidora permaneça como um comprador de toda energia que necessita e, ao considerá-la também como minigerador, faz a compra de toda a energia fotogerada. O preço de venda da energia fotogerada é calculado de forma a atrair investimentos da iniciativa privada na geração por fontes renováveis. Na Alemanha, o valor da tarifa prêmio (valor da remuneração do kWh

fotogerado) corresponde a aproximadamente duas vezes o valor da tarifa normal de compra de energia pelo consumidor. Essa variação depende da configuração em que for instalado o painel e também da potência instalada (GERMANY, 2004). Para custear esta tarifa prêmio foi criado um encargo na tarifa convencional, de cerca de 3% do valor total. Este encargo objetiva viabilizar a expansão do uso das fontes alternativas de energia através de investimentos da iniciativa privada (WENZEL, 2007).

### 2.2.1 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil

No Brasil ainda existem poucos SFCRs, e a grande maioria está instalada em universidades e centros de pesquisa, o que evidencia o caráter de prospecção dos benefícios e da viabilidade desta tecnologia. Pouquíssimas são as instalações voltadas ao aspecto de geração efetiva de energia. Esta situação é completamente diferente do que está ocorrendo nos países desenvolvidos, onde políticas públicas permitiram a implantação em larga escala deste tipo de instalação, seja em sistemas de pequeno porte integrados a edificações urbanas, ou em “fazendas solares” onde grandes blocos de energia são produzidos e transmitidos até os centros de consumo.

A Tabela 1 apresenta uma lista com os SFCR em operação no Brasil de que se tem notícia, apresentada na ordem cronológica de instalação das mesmas. Na sequência, é apresentado um descritivo com as informações mais relevantes das instalações listadas.

#### 2.2.1.1 Sistema FV LABSOLAR / UFSC

O sistema FV do LABSOLAR / UFSC está instalado no bloco B do departamento de engenharia mecânica da UFSC. Em operação desde setembro de 1997, é o primeiro sistema FV conectado à rede no Brasil e integrado a uma edificação urbana, utilizando módulos de silício amorfo (a-Si). Inicialmente era composto por 68 módulos de a-Si depositado sobre vidro, da marca ASI, modelo ASE-30-DG-UT, sendo 54 opacos (32 Wp) e 14 semitransparentes (27 Wp), totalizando 2,11 kWp, e utilizando 4 inversores WÜRTH de 650 W. Os módulos encontram-se voltados para o norte e com inclinação de 27° (correspondente à latitude local), ocupando uma área de 40,8 m<sup>2</sup>.



**Tabela 1: SFCR em operação no Brasil.**

<b>Sistema FV</b>	<b>Cidade</b>	<b>Ano</b>	<b>Potência (kWp)</b>
LABSOLAR / UFSC	Florianópolis - SC	1997	2,02
LSF – IEE / USP	São Paulo - SP	1998	0,75
Centro de Convivência / UFSC	Florianópolis - SC	2000	1,10
LSF – IEE / USP	São Paulo - SP	2001	12,30
CEPEL	Rio de Janeiro - RJ	2002	16,32
Intercâmbio Eletromecânico IEM	- Porto Alegre - RS	2002	3,00
CELESC / UFSC	Florianópolis - SC	2003	1,40
CELESC / UFSC	Lages – SC	2004	1,40
CELESC / UFSC	Tubarão - SC	2004	1,40
Centro de Cultura e Eventos UFSC	/ Florianópolis - SC	2004	10,24
Lab. Energia Solar / UFRGS	Porto Alegre - RS	2004	4,80
LSF – IEE / USP	São Paulo - SP	2004	3,00
Lab. de Sementes / CEMIG / UFSC	/ Belo Horizonte - MG	2005	3,15
FAE / UFPE	Recife - PE	2005	1,28
Clínica Harmonia	São Paulo - SP	2005	0,90
Casa Eficiente / ELETROSUL / UFSC	/ Florianópolis - SC	2006	2,25
LH2 – UNICAMP / CPFL	Campinas - SP	2006	7,50
Greenpeace	São Paulo – SP	2007	2,80
Restaurante Lampião / UFPE	Piranhas - AL	2007	1,50
CEFET-MG	Belo Horizonte - MG	2007	3,24
GEDAE / UFPA	Belém - PA	2007	1,58
Residência particular	São Paulo - SP	2008	2,87
Solaris	Leme - SP	2008	1,04
Motor Z / Grupo Zeppini / UFSC	São Bernardo do Campo - SP	2008	2,45
Fundição Estrela / Grupo Zeppini / UFSC	São Bernardo do Campo - SP	2008	14,69
Dígitro	São José - SC	2009	2,60
ELETROSUL / UFSC	Florianópolis - SC	2009	11,97
Colégio de Aplicação TRACTEBEL / UFSC	/ Florianópolis - SC	2009	1,99
Hospital Universitário TRACTEBEL / UFSC	/ Florianópolis - SC	2009	1,99
Aeroporto Hercílio Luz TRACTEBEL / UFSC	/ Florianópolis - SC	2009	2,12
Posto BR	Rio de Janeiro - RJ	2009	1,12
COELBA	Salvador - BA	2009	3,12
Condomínio Pedra Branca UFSC	/ Palhoça - SC	2010	6,40
FAE – UFPE	Recife – PE	2010	3,30
<b>Total</b>			<b>137,59</b>

A partir de novembro de 2008, o sistema foi reconfigurado visando à atualização dos inversores. O sistema passou a utilizar um inversor SMA modelo SB2500. A utilização desse inversor exigiu a reconfiguração dos módulos em uma configuração na qual a tensão CC é bastante elevada ( $\approx 600$  V em circuito aberto e  $\approx 400$  V no ponto de máxima potência), e passou a ser composto por quatro *strings* com 13 módulos opacos em série e mais um *string* com 13 módulos semitransparentes em série, totalizando 2,02 kWp.

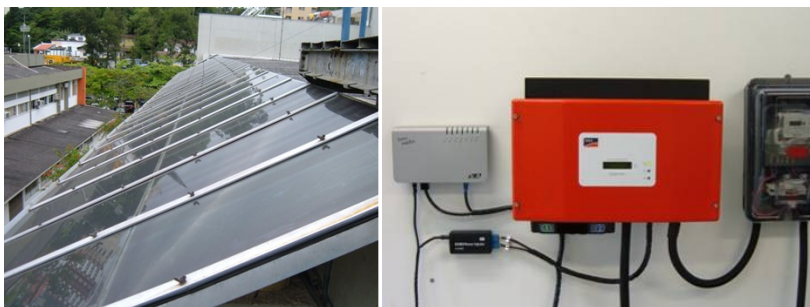
Este sistema FV, que já era monitorado desde a sua implantação, agora conta com um sistema de aquisição de dados mais sofisticado, onde os dados de geração, de irradiância e de temperatura dos módulos são reunidos em uma central de monitoramento (Sunny WebBox) via interface RS485 e disponibilizados no portal da SMA<sup>3</sup>. A Figura 5 apresenta uma vista geral do prédio no qual foi instalado o SFCR e a Figura 6 os módulos e o inversor utilizados.



**Figura 5:** Vista geral do prédio do departamento de engenharia mecânica da UFSC, na cobertura do qual foi instalado o SFCR de 2,02 kWp do LABSOLAR.

---

<sup>3</sup> <http://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPagesPlantList.aspx>.



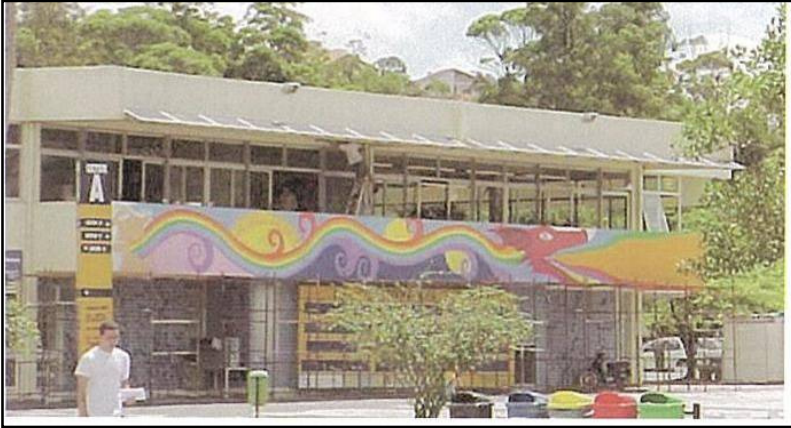
**Figura 6:** Vista dos módulos e inversor SB2500 do SFCR de 2,02 kWp do LABSOLAR / UFSC.

#### 2.2.1.2 Sistema FV LSF – IEE / USP (0,75 kWp)

De acordo com Oliveira (2002), o sistema FV de 0,75 kWp do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (LSF – IEE – USP) foi instalado em 1998. Este sistema é composto de 10 módulos de c-Si da marca SIEMENS, modelo SP75 (75 Wp) totalizando 0,75 kWp, e utilizando um inversor SMA modelo SWR700 de 700 W. Os módulos encontram-se inclinados a 23° (correspondente à latitude local) e voltados para o norte.

#### 2.2.1.3 Sistema FV do Centro de Convivência / UFSC

O sistema FV do prédio do Centro de Convivência da UFSC foi instalado pela equipe do LABSOLAR em dezembro de 2000. Este sistema é composto por 18 módulos de a-Si com moldura rígida da marca UNI-SOLAR, modelo US-64 (64 Wp), totalizando 1,15 kWp, e utilizando dois inversores WÜRTH de 650 W. Os módulos encontram-se voltados para o norte e com inclinação de 27° (correspondente à latitude local), ocupando uma área de 18,2 m<sup>2</sup>. A Figura 7 apresenta uma vista geral do prédio no qual foi instalado o SFCR e a Figura 8 os módulos utilizados.



**Figura 7:** Vista geral do Centro de Convivência / UFSC, no qual foi instalado um SFCR de 1,15 kWp.



**Figura 8:** Vista dos módulos UNISOLAR US-64 do SFCR de 1,15 kWp do Centro de Convivência da UFSC.

#### 2.2.1.4 Sistema FV LSF – IEE / USP (12,3 kWp)

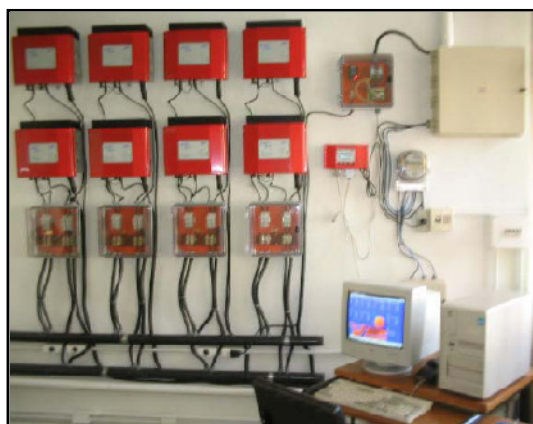
O SFCR do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (SFV – IEE – USP) foi instalado na fachada do prédio da administração do IEE/USP, em junho de 2001. Este sistema, inicialmente com 6,3 kWp, era composto por 20 módulos modelo MSX70 (70 Wp), 20 módulos modelo

MSX77 (77 Wp) e 40 módulos modelo MSX83 (83 Wp), todos da tecnologia de silício multicristalino (m-Si) da marca SOLAREX. Eram utilizados quatro inversores SMA modelo SB1100 de 1,1 kW cada (OLIVEIRA, 2002) (MACÊDO e ZILLES, 2005). Em 2003 foram incorporados à instalação mais 6 kWp em módulos FV da tecnologia de silício cristalino (c-Si) da marca ATERSA, e também mais quatro inversores SB1100 (BENEDITO, 2009). A Figura 9 apresenta a fachada do prédio citado, e a Figura 10 mostra os inversores utilizados.



**Figura 9:** Vista do prédio da administração do IEE – USP, no qual o SFCR de 12,3 kWp foi instalado em 2001 e ampliado em 2003.

Fonte: (ZILLES, 2009)



**Figura 10:** Vista dos inversores do SFCR de 12,3 kWp do LSF – IEE - USP.

Fonte: (MACÊDO e ZILLES, 2007)

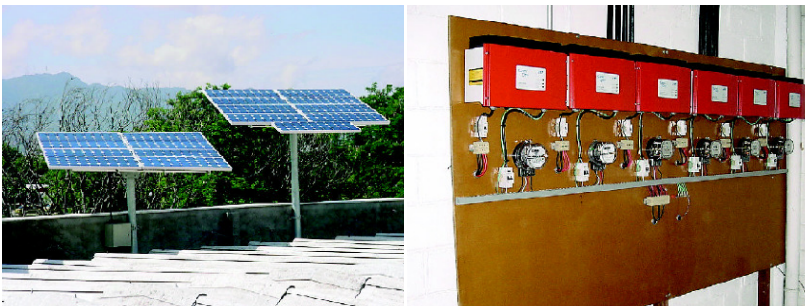
### 2.2.1.5 Sistema FV do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL)

De acordo com Galdino (2004), o sistema FV do CEPEL foi instalado em dezembro de 2002 na sua sede, na Ilha do Fundão no Rio de Janeiro. O sistema é composto por 204 módulos de c-Si da marca BP SOLAR, modelo BP580F (80 Wp) totalizando 16,32 kWp, e utilizando seis inversores SMA modelo SWR2500U. A Figura 11 apresenta uma vista geral do prédio no qual o SFCR foi instalado, e a Figura 12 mostra os módulos e os inversores utilizados.



**Figura 11:** Vista geral do prédio do CEPEL, no qual o SFCR de 16,32 kWp foi instalado.

Fonte: (MOSS, 2008)



**Figura 12:** Vista dos módulos BP580F e inversores SWR2500U do SFCR de 16,32 kWp do CEPEL.

Fonte: (GALDINO, 2003)

### 2.2.1.6 Sistema FV da empresa Intercâmbio Eletromecânico (IEM)

O sistema FV da IEM foi instalado em 2002 e totaliza 3 kWp em módulos FV de diversos tamanhos e potências. Utiliza três inversores SMA modelo SB1100 e um inversor SMA modelo Sunny Island de 3,3 kW ligado a 45 baterias de 100 Ah cada. O sistema FV é responsável por uma geração mensal média de aproximadamente 400 kWh. Os dados de geração são processados em uma central de monitoramento (Sunny WebBox) e disponibilizados na rede de computadores interna da IEM e no portal da SMA. A Figura 13 apresenta a vista geral do prédio da IEM no qual foi instalado o SFCR, a Figura 14 mostra os módulos e a Figura 15 os inversores utilizados.



**Figura 13:** Vista geral do prédio da IEM no qual o SFCR de 3 kWp foi instalado.

Fonte: (SMA, 2009a)



**Figura 14:** Vista dos módulos do SFCR de 3 kWp da IEM.

Fonte: (SMA, 2009a)



**Figura 15:** Vista dos inversores do SFCR de 3 kWp da IEM.

Fonte: (SMA, 2009a)

### 2.2.1.7 Sistema FV CELESC (sede) / UFSC

O sistema FV da CELESC em Florianópolis foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da CELESC em dezembro de 2003. Este sistema é composto por 11 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-128-B (128 Wp), totalizando 1,41 kWp, e utiliza dois inversores WÜRTH de 650 W. Os módulos encontram-se voltados para o norte e colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupam uma área de 24 m<sup>2</sup>. A Figura 16 apresenta uma vista geral do sistema e a Figura 17 os inversores utilizados.





**Figura 16:** Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Florianópolis.



**Figura 17:** Vista dos inversores WÜRTH utilizados no SFCR de 1,41 kWp da CELESC em Florianópolis.

### 2.2.1.8 Sistema FV CELESC (Lages) / UFSC

O sistema FV da CELESC em Lages foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da CELESC em janeiro de 2004. Este sistema é composto por 11 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-128-B (128 Wp), totalizando 1,41 kWp, e utiliza dois inversores WÜRTH de 650 W cada. Os módulos encontram-se voltados para o norte e colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupam uma área de 24 m<sup>2</sup>. A Figura 18 apresenta uma vista geral do sistema.



**Figura 18:** Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Lages.

### 2.2.1.9 Sistema FV CELESC (Tubarão) / UFSC

O sistema FV da CELESC em Tubarão foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da CELESC em janeiro de 2004. Este sistema é composto por 11 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-128-B (128 Wp), totalizando 1,41 kWp, e utiliza dois inversores WÜRTH de 650 W cada. Os módulos encontram-se voltados para o norte e colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupam uma área de 24 m<sup>2</sup>. A Figura 19 apresenta uma vista geral do sistema.



**Figura 19:** Vista geral do sistema FV de 1,41 kWp da CELESC, em Tubarão.

#### 2.2.1.10 Sistema FV do Centro de Cultura e Eventos / UFSC

O sistema FV do prédio do Centro de Cultura e Eventos da UFSC teve seus módulos FV instalados pela equipe do LABSOLAR em 2003. Porém, a instalação dos inversores e início da operação do sistema só ocorreu em junho de 2004. Este sistema é composto por 80 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-128-B (128 Wp), totalizando 10,24 kWp, e utiliza seis inversores WÜRTH modelo Solar Star de 1.200 W e 1.500 W e um inversor SMA modelo SB2500 de 2500W. Os módulos encontram-se voltados para o norte e com inclinação de 27° (correspondente à latitude local), ocupando uma área de 173 m<sup>2</sup>. O sistema FV está dividido em sete subsistemas, configurados com diferentes potências. Cada subsistema possui um medidor de energia que apresenta o valor acumulado de energia gerada desde sua entrada em funcionamento. Essa energia gerada já supera os 78 MWh (até junho/2010). A Figura 20 apresenta uma vista geral do prédio no qual o SFCR foi instalado, e a Figura 21 mostra vistas dos módulos e dos inversores utilizados.



**Figura 20:** Vista geral do prédio do Centro de Cultura e Eventos da UFSC no qual foi instalado o SFCR de 10,24 kWp.



**Figura 21:** Vistas dos módulos FV e dos inversores utilizados no SFCR do Centro de Cultura e Eventos da UFSC.

#### 2.2.1.11 Sistema FV do Laboratório de Energia Solar / UFRGS

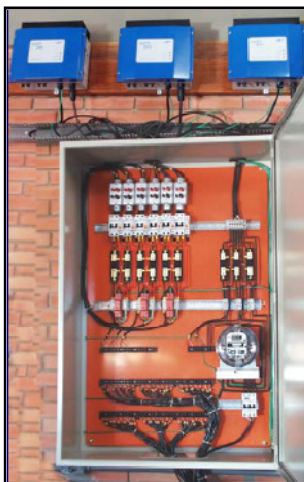
O sistema FV do Laboratório de Energia Solar da UFRGS foi instalado em 2004 e tem como principal característica o fato de possuir um quadro de conexões no lado CC que permite reconfigurar o sistema facilmente. Essa reconfiguração é realizada quando se deseja realizar ensaios em outro modelo de inversor, ou avaliar o desempenho desses para diferentes carregamentos, além de permitir um monitoramento eficaz dos módulos do sistema FV. O SFCR tem 4,8 kWp e utiliza três inversores SMA. A Figura 22 apresenta a vista geral do prédio no qual o

SFCR foi instalado e a Figura 23 o quadro de conexões do lado CC e os inversores utilizados.



**Figura 22:** Vista geral do prédio do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, no qual foi instalado o SFCR de 4,8 kWp.

Fonte: (ZILLES, 2009)



**Figura 23:** Vista do quadro de conexões e dos inversores utilizados no SFCR de 4,8 kWp da UFRGS.

Fonte: (PINHO, 2005)

### 2.2.1.12 Sistema FV LSF – IEE / USP (3 kWp)

De acordo com Lisita (2005), o sistema FV de 3 kWp do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo foi instalado em 2004. Este sistema é composto por 60 módulos de m-Si da marca ASTROPOWER, modelo APX-50 (50 Wp), totalizando 3 kWp, e utiliza três inversores SMA modelo SB1100U de 1.100 W. Os módulos encontram-se inclinados a 23° (correspondente à latitude local). A Figura 24 apresenta a vista geral do sistema e a Figura 25 os inversores utilizados.



**Figura 24:** Vista geral do SFCR de 3 kWp do LSF-IEE / USP.

Fonte: (ZILLES, 2009)



**Figura 25:** Vista dos inversores SB1100U utilizados no SFCR de 3 kWp do LSF – IEE / USP.

Fonte: (LISITA, 2005)

### 2.2.1.13 Sistema FV do Laboratório de Sementes / CEMIG / UFSC

O sistema FV do Laboratório de Sementes da CEMIG em Belo Horizonte foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da CEMIG em março de 2005. Este sistema é composto por 45 módulos de silício cristalino (c-Si) da marca SHELL-SOLAR, modelo SP-70 (70 Wp) totalizando 3,15 kWp, e utiliza três inversores SMA modelo SB1100. Os módulos encontram-se orientados para noroeste e com inclinação de 20° (correspondente à latitude local), ocupando uma área de 28,5 m<sup>2</sup>. A Figura 26 apresenta uma vista geral do sistema e a Figura 27 os inversores utilizados.



**Figura 26:** Vista geral do SFCR de 3,15 kWp do Laboratório de Sementes da CEMIG.



**Figura 27:** Vista dos inversores SB1100 do SFCR de 3,15 kWp do Laboratório de Sementes da CEMIG.

#### 2.2.1.14 Sistema FV do Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia / UFPE

O sistema FV da UFPE foi instalado em 2005 e encontra-se em sua terceira reconfiguração. Atualmente conta com 16 módulos da tecnologia m-Si modelo KC80, com 80 Wp cada, totalizando 1,28 kWp e utiliza um inversor de 1,1 kW (BARBOSA *et al.*, 2008; BARBOSA *et al.*, 2007). A Figura 28 mostra o painel FV e a Figura 29 o inversor utilizado.



**Figura 28:** Vista geral do SFCR de 1,28 kWp da UFPE.

Fonte: (BARBOSA *et al.*, 2008)



**Figura 29:** Vista do inversor de 1,1 kW do SFCR de 1,28 kWp da UFPE.

Fonte: (BARBOSA *et al.*, 2008)



### 2.2.1.15 Sistema FV da Clínica Harmonia; São Paulo:

Instalado pela Empresa SOLARIS em 2005, o sistema FV da Clínica Harmonia, em São Paulo – SP, conta com 12 módulos ATERSA de 75 Wp cada, totalizando 900 Wp, e utiliza um inversor SMA de 800 W (BENEDITO, 2009).

### 2.2.1.16 Sistema FV da Casa Eficiente / ELETROSUL / UFSC

O sistema FV da Casa Eficiente, construída na sede da ELETROSUL em Florianópolis, foi instalado pelas equipes do LABSOLAR, da CELESC e da ELETROSUL em julho de 2006. Este sistema é composto por 30 módulos da tecnologia m-Si da marca Golden Genesis, modelo GP-75 (75 Wp) totalizando 2,25 kWp, e utiliza dois inversores WÜRTH modelo Solar Star de 1.500 W cada. Os módulos encontram-se voltados para o norte e com inclinação de 27° (correspondente à latitude local), e ocupam uma área de 21 m<sup>2</sup>. As imagens da Figura 30 apresentam uma vista geral dos módulos e dos inversores utilizados.



**Figura 30:** Vista geral dos módulos e dos inversores do SFVR de 2,25 kWp da Casa Eficiente / ELETROSUL.

### 2.2.1.17 Sistema FV da UNICAMP / CPFL

O sistema FV da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) faz parte de um projeto de pesquisa junto com o Laboratório de Hidrogênio da Universidade de Campinas (UNICAMP). É constituído por 60 módulos KYOCERA modelo KC125TM, de 125 Wp cada, totalizando 7,5 kWp, e utiliza três inversores SMA modelo SB2500U. A Figura 31 mostra o arranjo FV e os inversores utilizados.



**Figura 31:** Vista geral dos painéis FV e dos inversores do SFCR de 7,5 kWp da UNICAMP.

### 2.2.1.18 Sistema FV do Greenpeace

O sistema FV do Greenpeace, em São Paulo – SP, foi instalado em 2007 e é responsável pela geração de 20% da energia consumida pela entidade. É constituído por 40 módulos da tecnologia c-Si da marca SHELL modelo SQ-70, de 70 Wp cada, totalizando 2,8 kWp, e utiliza um inversor XANTREX modelo GT-3.0. A Figura 32 apresenta uma vista geral do arranjo FV e a Figura 33 mostra o inversor utilizado.



**Figura 32:** Vista geral do arranjo FV de 2,9 kWp do GREENPEACE.

Fonte: (ZILLES, 2009)



**Figura 33:** Inversor XANTREX modelo GT-3.0 do SFCR de 2,9 kWp do GREENPEACE.

#### 2.2.1.19 Sistema FV do Restaurante Lampião

O sistema FV do Restaurante Lampião foi instalado em 2007 às margens do rio São Francisco, no município de Piranhas – AL, com a assessoria do grupo de pesquisa em fontes alternativas de energia da UFPE. O SFCR possui 12 módulos de 125 Wp dispostos no formato de um peixe, com 1,5 kWp, e utiliza um inversor de 1,1 kW. O sistema FV foi projetado para suprir cerca de 50% da energia consumida no estabelecimento (BENEDITO, 2009). A Figura 34 mostra o painel FV desse sistema.



**Figura 34:** Vista geral do sistema FV de 1,5 kWp do Restaurante Lampião, em Piranhas - AL.

#### 2.2.1.20 Sistema FV do CEFET-MG

O sistema FV do CEFET-MG, em Belo Horizonte, foi instalado em 2007 e é composto por 54 módulos de silício multicristalino (m-Si) da marca KYOCERA, modelo KC60 (60 Wp), totalizando 3,24 kWp, e utiliza três inversores SMA modelo SB1100. Os módulos encontram-se voltados para o norte e com inclinação de  $20^\circ$  (correspondente à latitude local), ocupando uma área de aproximadamente  $27 \text{ m}^2$ . A Figura 35 apresenta uma vista inferior do painel FV do SFCR do CEFET-MG.



**Figura 35:** Vista inferior do painel FV do SFCR do CEFET-MG.

### 2.2.1.21 Sistema FV do GEDAE / UFPA

O sistema FV do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Guamá, na cidade de Belém, foi instalado em 2007, e é composto por 21 módulos de silício cristalino (c-Si) da marca SIEMENS, modelo SP75 (75 Wp), totalizando 1,58 kWp, e um inversor ENERTRON, modelo SOLETE 2500. A Figura 36 apresenta uma vista geral do painel FV do sistema, e a Figura 37 o inversor utilizado.



**Figura 36:** Vista geral do painel FV do sistema de 1,58 kWp do GEDAE / UFPA.



**Figura 37:** Inversor SOLETE 2500 utilizado no SFCR de 1,58 kWp do GEDAE / UFPA.

### 2.2.1.22 Sistema FV de uma residência em São Paulo – SP

Este SFCR foi instalado em 2008 pela empresa EBEA Engenharia em uma residência particular em São Paulo – SP, tem potência de 2,87 kWp, utiliza 41 módulos FV da marca SHELL, modelo

SQ-70 (70 Wp) e um inversor XANTREX modelo GT-3.3 (comunicação pessoal<sup>4</sup>). A Figura 38 mostra parte dos módulos que compõem o arranjo FV e a Figura 39 o inversor utilizado.



**Figura 38:** Parte dos módulos FV do SFCR de 2,87 kWp de uma residência em São Paulo - SP.

Fonte: Eduardo Bomeisel.



**Figura 39:** Inversor XANTREX utilizado no SFCR de 2,87 kWp de uma residência em São Paulo - SP.

Fonte: Eduardo Bomeisel.

### 2.2.1.23 Sistema FV da empresa SOLARIS

A empresa SOLARIS, com sede em Leme – SP, atua na área de energias renováveis e possui em sua sede um SFCR de 1,04 kWp, constituído por oito módulos de 130 Wp e um inversor SMA modelo

---

<sup>4</sup> Informações e fotos do SFCR foram fornecidas pelo Sr. Eduardo Bomeisel, da EBEA Engenharia, através de mensagem eletrônica em 23/06/2010.

SB1200 (comunicação pessoal<sup>5</sup>). A Figura 40 mostra o painel FV deste SFCR, e a Figura 41 o inversor e a central de armazenamento de dados (Sunny WebBox).



**Figura 40:** Painel FV de 1,04 kWp do SFCR da empresa SOLARIS em Leme – SP.

Fonte: Hélio Ricardo Alves.



**Figura 41:** Inversor e WebBox do SFCR de 1,04 kWp da empresa SOLARIS, em Leme - SP.

Fonte: Hélio Ricardo Alves.

<sup>5</sup> Informações e fotos do SFCR foram fornecidas pelo Sr. Hélio Ricardo Alves, da SOLARIS, através de mensagem eletrônica em 28/06/2010.

### 2.2.1.24 Sistema FV da Motor Z / Grupo Zeppini / UFSC

O sistema FV da Motor Z, empresa do Grupo Zeppini, em São Bernardo do Campo – SP, foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da Zeppini em junho de 2008. Este sistema é composto por 18 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-136-B (136 Wp), totalizando 2,45 kWp, e utiliza dois inversores SMA modelo SB1100. Os módulos estão colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupam uma área de 39 m<sup>2</sup>. A Figura 42 apresenta uma vista geral do painel FV do sistema e a Figura 43 os inversores utilizados.



**Figura 42:** Vista geral do painel FV do sistema de 2,45 kWp da Motor Z.

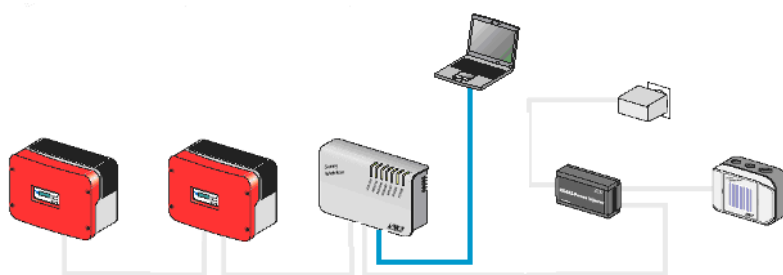
Os dados de geração, de irradiância e de temperatura dos módulos são reunidos em uma central de monitoramento (Sunny WebBox) e disponibilizados na rede de computadores interna do Grupo Zeppini e no portal da SMA.



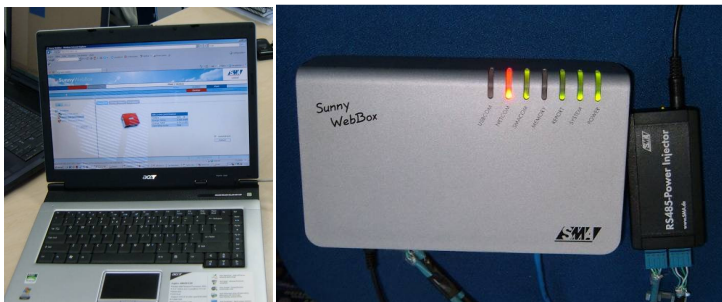


**Figura 43:** Vista dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.

Cada inversor possui uma placa de comunicação via interface RS485 (circuitos “piggy-back” RS485), para enviar os dados de geração dos inversores ao Sunny WebBox, que também está conectado via RS485 ao Sunny Sensor que recebe os dados de irradiância e de temperatura dos módulos. A Figura 44 ilustra a configuração do sistema de aquisição de dados descrito, e a Figura 45 mostra a página de acesso ao portal da SMA e a central de monitoramento Sunny WebBox.



**Figura 44:** Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados via RS485 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.



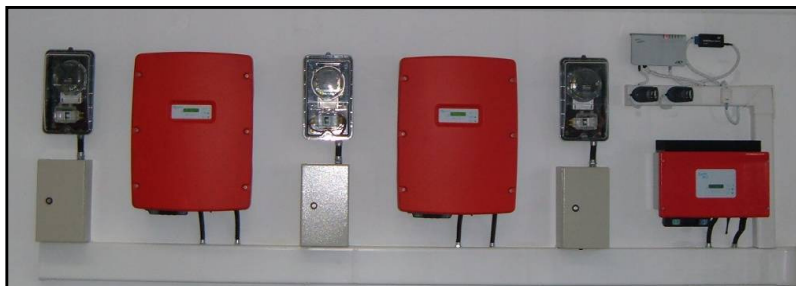
**Figura 45:** Acesso ao portal da SMA e Sunny WebBox do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.

#### 2.2.1.25 Sistema FV da Fundação Estrela / Grupo Zeppini / UFSC

O sistema FV da Fundação Estrela (também pertencente ao Grupo Zeppini), em São Bernardo do Campo – SP, foi instalado pelas equipes do LABSOLAR e da Zeppini em junho de 2008. Este sistema é composto de 117 módulos de filmes finos flexíveis de a-Si da marca UNI-SOLAR, sendo 99 do modelo PVL-136-B (136 Wp), e mais 18 do modelo PVL-68-B (68 Wp), totalizando 14,69 kWp, e utiliza dois inversores SMA modelo SMC6000A e um inversor SMA modelo SB2500. Os módulos estão colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupam uma área de 233 m<sup>2</sup>. A Figura 46 apresenta duas imagens do painel FV e a Figura 47 uma vista dos inversores utilizados.



**Figura 46:** Vistas do painel FV do sistema de 14,69 kWp da Fundação Estrela.



**Figura 47:** Vista com os inversores SMC6000A e SB2500 do SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela.

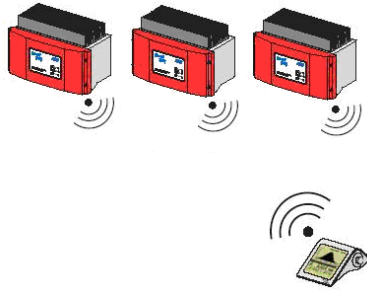
A aquisição dos dados de geração é baseada em uma unidade de monitoramento do tipo sem fio (*wireless*), para leitura de dados dos três inversores SMA. Cada inversor possui uma placa de comunicação via rádio (circuitos “*piggy-back*” rádio) para enviar os dados de geração de cada inversor ao Sunny Beam.

O Sunny Beam é uma unidade de monitoramento sem fio, que recebe o sinal via rádio em uma frequência de 868 MHz, a uma distância em locais abertos de até 100 m, e em locais fechados de até 30 m, com relação à posição dos inversores.

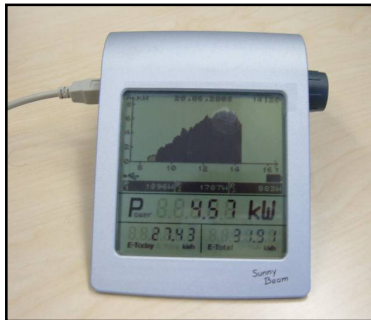
Os inversores do SFCR da Fundação Estrela (dois SMC6000A e um SB2500) enviam via sinais de rádio os dados para o Sunny Beam, onde são apresentados em um mostrador (*display*) de cristal líquido. Este mostrador é a interface com o usuário, no qual podem ser observados os valores de potência instantânea (em kW) e de energia acumulada (em kWh) entregue à rede elétrica. Estas informações podem ainda ser transferidas para um computador pessoal, via porta USB.

A parte posterior do Sunny Beam é dotada de um pequeno conjunto de células FV, responsáveis por fornecer a energia necessária ao seu próprio funcionamento. Devido a este fato, o equipamento deve ser alocado sobre uma superfície (mesa) e receber luz do sol, ou receber boa iluminação, periodicamente.

A Figura 48 ilustra a configuração do sistema de aquisição de dados descrito, e a Figura 49 mostra o Sunny Beam da Fundação Estrela.



**Figura 48:** Diagrama representativo do sistema SMA de aquisição de dados via rádio, utilizado no SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela.



**Figura 49:** Sunny Beam utilizado no SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela.

#### 2.2.1.26 Sistema FV da empresa Dígitro

Instalado em janeiro de 2009, com 2,6 kWp, o SFCR da empresa Dígitro é composto por 20 módulos da tecnologia m-Si da KYOCERA, modelo KC130TM (130 Wp), e um inversor XANTREX modelo GT-3.0. A empresa pretende ampliar o arranjo FV para até 120 módulos, sendo que a estrutura de fixação para o arranjo FV já foi construída. Por política da empresa, fotos da instalação não são divulgadas (comunicação pessoal<sup>6</sup>).

<sup>6</sup> As informações sobre o SFCR da Dígitro foram fornecidas pelo Sr. Murilo Kretzer por telefone em junho/2010.

### 2.2.1.27 Sistema FV da ELETROSUL / UFSC

O sistema FV da ELETROSUL em Florianópolis, foi projetado pelas equipes do LABSOLAR e LabEEE, ambos da UFSC e executado pela equipe da empresa SOLARTERRA, sob a supervisão das equipes da UFSC e da ELETROSUL, entrou em operação em fevereiro de 2009, e está localizado no pátio do edifício sede da ELETROSUL em Florianópolis, no caminho de acesso dos funcionários. Trata-se de uma estrutura metálica recoberta com módulos FV de filme fino flexível de a-Si da marca UNI-SOLAR, modelo PVL-136-T (136 Wp). São 88 módulos FV, totalizando 11,97 kWp, e são utilizados três inversores SMA modelo SB4000US. Os módulos encontram-se colados sobre uma superfície curva com inclinação variada, e ocupando uma área de 190 m<sup>2</sup>. A Figura 50 apresenta uma vista geral do SFCR e a Figura 51 os inversores utilizados.



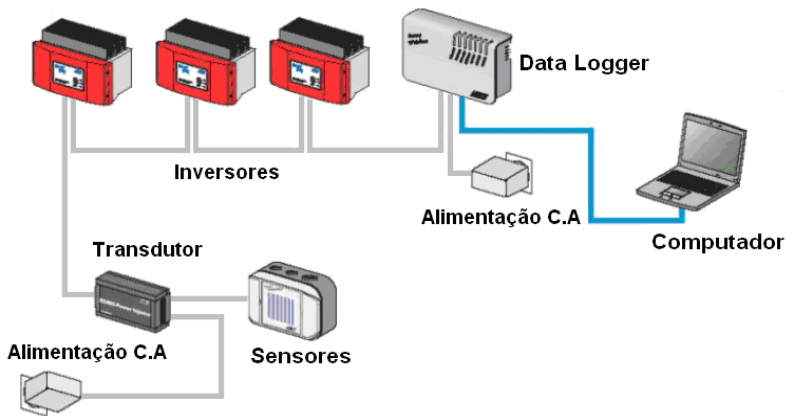
**Figura 50:** Vista geral do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL.



**Figura 51:** Vista dos inversores SB4000US do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL.

O sistema conta ainda com uma central de monitoramento (Sunny WebBox) que, via interface RS485, se comunica com os inversores que

são dotados de circuitos “piggy-back” RS485, que disponibilizam dados de potência, energia, tensão CC e CA, corrente CC e CA, códigos de erros, entre outros. Os dados de irradiância, temperatura dos módulos FV e temperatura ambiente são enviados ao Sunny WebBox através do Sunny Sensor. Todos esses dados são coletados periodicamente através de um computador interligado via cabo de rede ao Sunny WebBox. A Figura 52 ilustra a configuração do sistema de aquisição de dados descrito.



**Figura 52:** Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL.

### 2.2.1.28 Sistema FV do Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC

O sistema FV do Colégio de Aplicação da UFSC foi instalado no âmbito de uma parceria da UFSC com a TRACTEBEL. Entrou em operação em maio de 2009 e está localizado no Campus da UFSC, em Florianópolis, próximo ao acesso do Colégio de Aplicação. O sistema foi projetado e executado pelas equipes do LABSOLAR e do LabEEE. Trata-se de uma estrutura metálica que recebeu em sua cobertura os módulos FV de filmes finos de silício microcristalino também conhecido por *micromorph* ( $\mu$ -Si) da marca SONTOR/Q.CELLS, modelo SN2 (132,5 Wp). São 15 módulos FV totalizando 1,99 kWp. É utilizado um inversor SMA modelo SB2500. Os módulos encontram-se voltados a  $31^\circ$  leste de desvio azimutal em relação ao norte, com inclinação de  $5^\circ$  e ocupando uma área de  $27 \text{ m}^2$ . A Figura 53 apresenta

uma vista geral do sistema e a Figura 54 uma vista da parte interna da caixa de conexões, com o inversor utilizado.

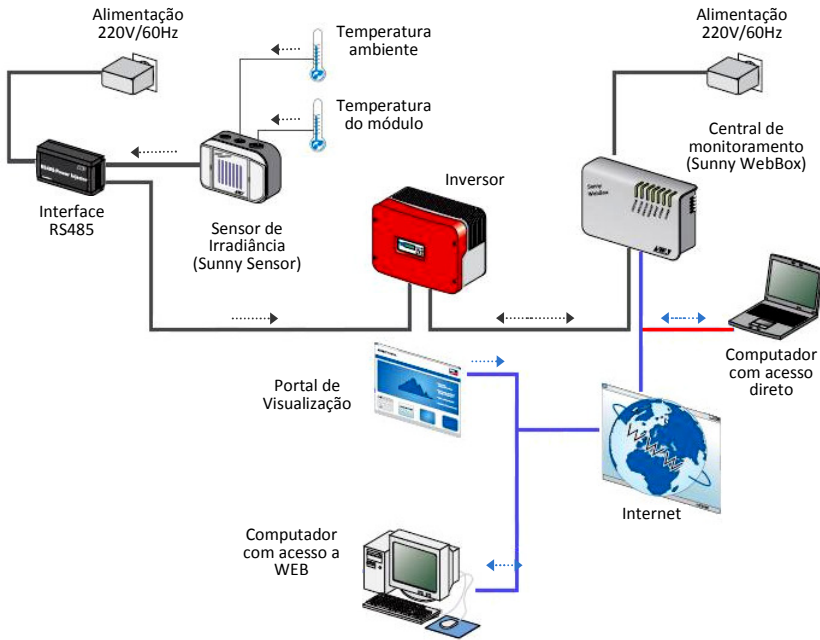


**Figura 53:** Vista geral do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC.



**Figura 54:** Vista da parte interna da caixa de conexões do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com o inversor SB2500 na parte superior.

O sistema conta ainda com uma central de monitoramento (Sunny WebBox) que, via interface RS485, se comunica com o inversor dotado de um circuito “*piggy-back*” RS485. Os dados de irradiação, temperatura dos módulos FV e temperatura ambiente são enviados ao Sunny WebBox através do Sunny Sensor. Todos estes dados estarão disponíveis na rede interna de computadores da UFSC e *internet* através do portal da SMA. A Figura 55 ilustra a configuração do sistema de aquisição de dados descrito.



**Figura 55:** Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC.

### 2.2.1.29 Sistema FV do Hospital Universitário / TRACTEBEL / UFSC

O sistema FV do Hospital Universitário da UFSC foi instalado no âmbito de uma parceria da UFSC com a TRACTEBEL. Entrou em operação em junho de 2009 e está localizado no Campus da UFSC, em Florianópolis, próximo ao acesso do Hospital Universitário. O sistema foi projetado e executado pelas equipes do LABSOLAR e do LabEEE.



Trata-se de uma estrutura metálica que recebeu em sua cobertura os módulos FV de filmes finos de silício microcristalino também conhecido por *micromorph* ( $\mu$ -Si) da marca SONTOR/Q.CELLS, modelo SN2 (132,5 Wp). São 15 módulos FV, totalizando 1,99 kWp. É utilizado um inversor SMA modelo SB2500. Os módulos encontram-se voltados a 5° oeste de desvio azimutal em relação ao norte, com inclinação de 5° e ocupando uma área de 27 m<sup>2</sup>. A Figura 56 apresenta uma vista geral do sistema e a Figura 57 uma vista interna da caixa de conexões com o inversor utilizado.



**Figura 56:** Vista geral do sistema FV de 1,99 kWp do Hospital Universitário / TRACTEBEL / UFSC.



**Figura 57:** Vista da parte interna da caixa de conexões do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário na UFSC, com o inversor SB2500 na parte superior.

O sistema também conta com uma central que monitora e disponibiliza os dados de geração, irradiância e de temperatura, já descritos para o SFCR do Colégio de Aplicação da UFSC.

#### 2.2.1.30 Sistema FV do Aeroporto Hercílio Luz / TRACTEBEL / UFSC

O sistema FV do Aeroporto Hercílio Luz foi instalado no âmbito de uma parceria da UFSC com a TRACTEBEL. Entrou em operação em junho de 2009 e está localizado sobre uma das edificações do terminal de cargas da INFRAERO no Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis, próximo à pista das aeronaves. O sistema foi projetado e executado pelas equipes do LABSOLAR e do LabEEE. Trata-se da instalação sobre uma cobertura já existente no Aeroporto, de uma estrutura metálica onde foram fixados os módulos FV de filmes finos de silício microcristalino também conhecido por *micromorph* ( $\mu$ -Si) da marca SONTOR/Q.CELLS, modelo SN2 (132,5 Wp). São 16 módulos FV totalizando 2,12 kWp. É utilizado um inversor SMA modelo SB2500. Os módulos foram instalados voltados a  $43^\circ$  leste de desvio azimutal em relação ao norte, com inclinação de  $7^\circ$  e ocupando uma área de 28,5 m<sup>2</sup>. A Figura 58 apresenta uma vista geral do sistema e a Figura 59 o inversor utilizado.



**Figura 58:** Vista geral do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis.



**Figura 59:** Vista do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis.

O sistema também conta com uma central que monitora e disponibiliza os dados de geração, irradiância e de temperatura, já descritos para o sistema FV do Colégio de Aplicação da UFSC.

#### 2.2.1.31 Sistema FV do posto de combustíveis BR no Rio de Janeiro

Em junho de 2009 foi instalado pela equipe da empresa Energia Z, pertencente ao grupo Zeppini, um SFCR de 1,12 kWp. O sistema é formado por 28 módulos de filmes finos de a-Si da marca BANGKOK SOLAR modelo BS-40 (40 Wp) e um inversor SMA modelo SB1100. Localizado na cidade do Rio de Janeiro – RJ é o primeiro posto de combustíveis no Brasil a disponibilizar a seus clientes, energia elétrica proveniente de um gerador FV para o abastecimento de veículos elétricos. A Figura 60 mostra o painel FV na cobertura do posto e a Figura 61 o inversor utilizado.



**Figura 60:** Vista do posto BR no Rio de Janeiro com o painel FV de 1,12 kWp em sua cobertura.

Fonte: Samir Nunes Ribeiro



**Figura 61:** Inversor SB1100, caixa de conexões e medidor de energia utilizados no SFCR de 1,12 kWp no posto BR do Rio de Janeiro - RJ.

Fonte: Samir Nunes Ribeiro

### 2.2.1.32 Sistema FV da COELBA

O SFCR da Companhia de Eletricidade da Bahia (COELBA), em Salvador – BA, possui 24 módulos FV da tecnologia m-Si da KYOCERA modelo KC130 (130 Wp), totalizando 3,12 kWp. Utiliza um inversor marca ENERTRON, modelo SOLETE 2500, e encontra-se operando desde outubro de 2009. A Figura 62 mostra o painel FV desse sistema.



**Figura 62:** Paineis FV do SFCR de 3,12 kWp da COELBA, em Salvador - BA.

#### 2.2.1.33 Sistema FV do Condomínio Pedra Branca / UFSC

O SFCR montado no *showroom* do Condomínio Pedra Branca em Palhoça – SC, região metropolitana de Florianópolis, entrou em operação em maio de 2010. Com 6,4 kWp, é constituído por 160 módulos de a-Si da marca BANGKOK SOLAR, modelo BS-40 (40 Wp). É utilizado um inversor SMA modelo SMC6000A e o sistema conta ainda com uma central de monitoramento (Sunny WebBox) conectada à internet, similar às já descritas nos itens anteriores. A Figura 63 mostra uma vista superior onde aparecem parte dos módulos, e a Figura 64 mostra o inversor utilizado.



**Figura 63:** Vista do painéis FV de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca em Palhoça - SC.



**Figura 64:** Vista do inversor SMC6000A e do medidor de energia do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca, em Palhoça - SC.

#### 2.2.1.34 Sistema FV da UFPE

Este é mais um SFCR instalado pelo Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia da UFPE. Localizado no campus da universidade em Recife – PE, denominado Escultura Solar, e entrou em operação em junho de 2010. Utiliza 66 módulos de filmes finos e totaliza 3,3 kWp. A Figura 65 mostra o gerador FV.



**Figura 65:** – Vista do SFCR FV de 3,3 kWp da UFPE, em Recife - PE.

## 2.2.2 Minirrede híbrida FV-diesel no Brasil

Ainda relacionado à utilização de inversores para SFCR, existem as minirredes de energia elétrica. Principalmente na região amazônica, existem centenas de minirredes que são operadas por produtores independentes de energia, não fazendo parte do sistema interligado de energia elétrica brasileiro (MARTINS *et al.*, 2008).

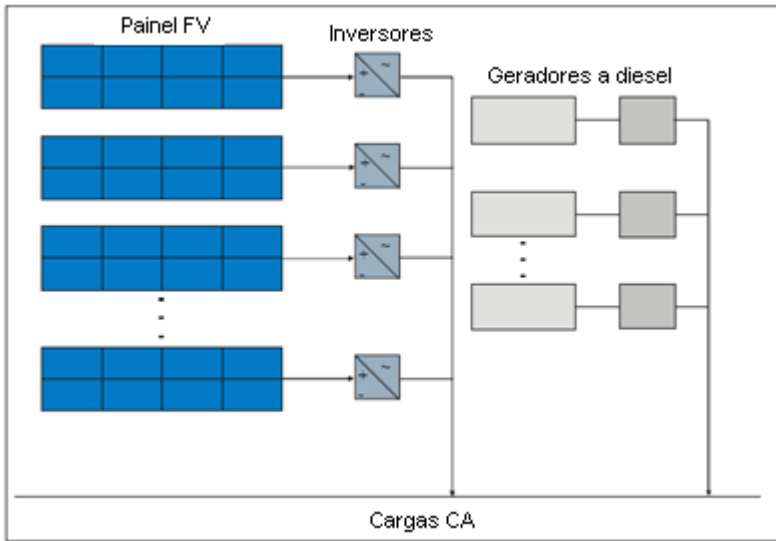
O LABSOLAR, no âmbito do projeto elaborado para o grupo GUASCOR do Brasil, realizou a implantação, na Vila de Araras, Nova Mamoré – RO, de um sistema FV de 20,48 kWp para operar junto a uma minirrede elétrica alimentada por geradores a diesel (dois de 60 kVA e um de 19 kVA). A minirrede opera de modo contínuo com um gerador diesel de 60 kVA, o segundo gerador diesel, de 19 kVA, entra/sai de operação automaticamente em função da demanda de energia, e o terceiro gerador diesel, de 60 kVA, é reserva do sistema (ABREU *et al.*, 2003; BEYER *et al.*, 2003). Com a instalação do sistema FV houve uma grande redução no consumo de diesel, visto que durante os momentos de alta incidência solar, só é necessário o acionamento de um gerador diesel para servir de referência de tensão para os inversores do sistema FV, e esse complementa a energia demandada pelos consumidores.

Este sistema FV está em operação desde abril de 2001. A Figura 66 mostra o diagrama esquemático do sistema híbrido FV-diesel implantado em Araras, a Figura 67 uma vista do painel FV e a Figura 68 os inversores utilizados.

O painel FV é composto por 320 módulos FV de silício amorfo com 64 Wp cada, e são utilizados 32 inversores da marca WÜRTH de 650 W.

Os 32 inversores serão substituídos até o final de 2010 por três inversores da marca KACO, modelo Powador 8000xi, de 8 kW cada, visando à revitalização do gerador FV.

Este sistema demonstra a viabilidade deste tipo de instalação, onde a geração FV é diretamente responsável pela redução no consumo de diesel.



**Figura 66:** Diagrama esquemático do sistema híbrido FV-diesel da vila de Araras, em Rondônia.



**Figura 67:** Vista do gerador FV de 20,48 kWp instalado na vila de Araras, em Rondônia.





**Figura 68:** Vista dos inversores WÜRTH utilizados no sistema híbrido FV-diesel da vila de Araras, em Rondônia.

Outro sistema nesta configuração é o instalado em Fernando de Noronha - PE, no âmbito do projeto envolvendo ANEEL, CELPE e UFPE. Opera desde 2002 e é formado por oito módulos de 300 Wp, totalizando 2,4 kWp, ligados a um inversor de 4 kW. A conexão é feita à rede elétrica da Usina Tubarão, que produz eletricidade a partir de geradores a diesel (BENEDITO, 2009). A Figura 69 fornece uma vista do painel fotovoltaico em operação no arquipélago de Fernando de Noronha.



**Figura 69:** Painel FV de 2,4 kWp instalado em Fernando de Noronha - PE.  
Fonte: (BARBOSA *et al.*, 2004 *apud* BENEDITO, 2009)

### **3 INVERSORES DE SFCR, A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA E A INTEGRAÇÃO AO AMBIENTE CONSTRUÍDO**

O inversor é o equipamento eletroeletrônico responsável pela conversão da energia de corrente contínua (CC) dos módulos FV em energia de corrente alternada (CA) a ser disponibilizada para as cargas. Dependendo do tipo de sistema FV, isolado ou conectado à rede elétrica, especifica-se o inversor a ser utilizado.

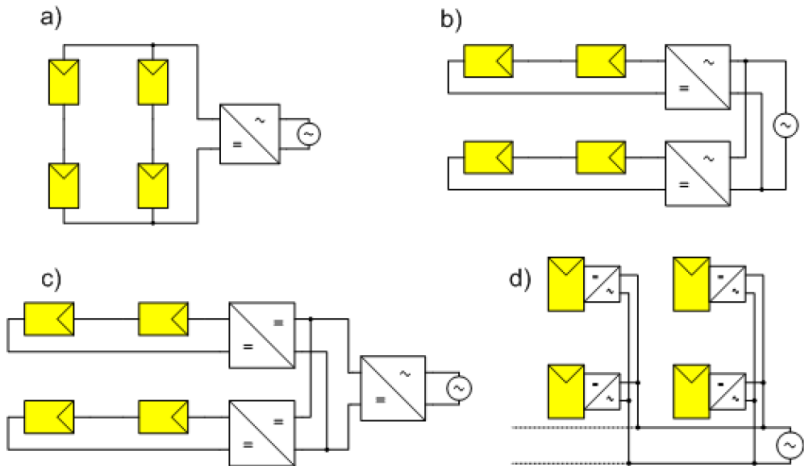
Os inversores para SFI recebem a energia em CC, normalmente de um banco de baterias que recebeu e acumulou a energia elétrica proveniente dos módulos FV. Este tipo de inversor produz em sua saída uma onda senoidal (*e.g.* 110 V<sub>CA</sub>; 60 Hz) de forma independente, sem depender de uma referência externa de tensão.

Já os inversores para SFCR, recebem a energia em CC diretamente dos módulos FV. A energia CA na sua saída é colocada diretamente em paralelo com a rede elétrica convencional. Assim, as duas ondas de tensão devem estar em fase e ter características elétricas bastante similares, de modo a possibilitar o paralelismo de geradores. A senoide produzida pelo inversor utiliza a onda da rede elétrica como referência. Havendo a referência, há geração FV. No caso de um desligamento da rede elétrica convencional, o inversor do sistema FV também é desligado automaticamente, conforme já citado, para evitar o efeito do ilhamento (CAAMAÑO-MARTÍN *et al.*, 2007). O requisito anti-ilhamento para os inversores utilizados em SFCR é descrito nas normas IEEE-519 e IEEE-929 (IEEE-519, 1992; IEEE-929, 2000). O monitoramento da tensão e da frequência são os primeiros a identificar o desligamento da rede elétrica. Porém, um terceiro método de evitar o ilhamento é o monitoramento da impedância da rede elétrica, que na Alemanha, para SFCR menores que 5 kWp deve ser menor que 1,75 Ω, ou se houver uma variação de impedância maior que 0,5 Ω (LUQUE e HEGEDUS, 2003).

Outro aspecto relevante em sistemas FV é o ponto de operação a que estão sujeitos os módulos FV. Eles possuem uma região de operação denominada de ponto de máxima potência (MPP), onde a potência fotogerada, que é o produto tensão  $\times$  corrente, apresenta seu máximo valor. Esse valor varia continuamente em função da irradiância e da temperatura. Portanto, sistemas que também de modo contínuo busquem colocar os módulos FV para operar em MPP melhoram o desempenho do sistema FV. Nos SFCR, o inversor normalmente já

possui essa função incorporada, Já nos SFI, o controlador de carga das baterias é o elemento que normalmente pode ou não realizar essa função.

Em um SFCR, o conjunto formado por inversor(es) e módulo(s) pode ser enquadrado basicamente em uma das quatro configurações apresentadas na Figura 70 (CASARO e MARTINS, 2010; KJAER *et al.*, 2005; SCHIMPF e NORUM, 2008).



**Figura 70:** Configurações de SFCR: a) inversor central; b) inversor por *string*; c) inversor *multi-string*; d) módulo CA.

Fonte: (SCHIMPF e NORUM, 2008)

A Figura 70a apresenta a configuração chamada de inversor central, onde várias séries de módulos são conectadas em paralelo e interligadas ao mesmo inversor. Essa configuração é normalmente a primeira escolha por sua simplicidade e baixo custo; porém, apresenta a desvantagem de não permitir a busca do MPP para cada série de módulos de forma independente. Neste caso, podem ocorrer as chamadas *mismatch losses* entre *strings*, que são perdas pelo efeito de diferenças nas características elétricas dos *strings* associados em paralelo.

Na configuração da Figura 70b é utilizado um inversor por *string*, ou seja, um inversor para cada série de módulos. Nessa configuração, as perdas são reduzidas e o ponto de MPP da série é efetivamente mantido. Como desvantagem em relação ao inversor central está o custo por kWp

instalado, uma vez que são utilizados mais inversores de menor potência.

Na Figura 70c é apresentada a configuração de inversor *multi-string*, onde o inversor possui mais de um circuito independente de busca de MPP, permitindo que o arranjo de módulos FV seja dividido em grupos e instalado em orientações ou inclinações diferentes.

Na Figura 70d, cada módulo FV possui um inversor acoplado e, consequentemente, um circuito de busca de MPP, colocando o módulo no melhor ponto de operação para as condições disponíveis de irradiância e temperatura; é também conhecido como módulo CA. Como desvantagem tem-se o alto custo e o fato de acoplar dois dispositivos com vida útil diferente (CALAIS *et al.*, 2002; MEINHARDT e CRAMER, 2000; SCHIMPF e NORUM, 2008; SMA, 2008c).

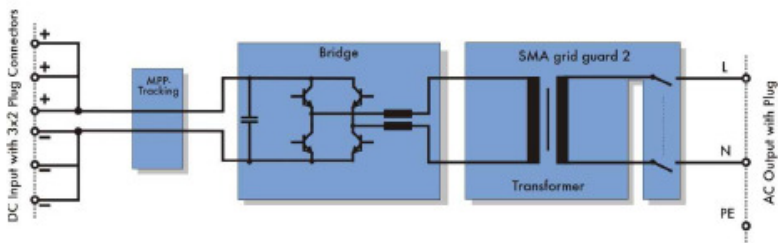
Os inversores para sistemas FV são também divididos em dois grupos: os comutados pela rede e os autocomutados. Os inversores comutados pela rede são normalmente usados para altas potências, enquanto os autocomutados são normalmente usados em potências menores (HESKES e ENSLIM, 2003).

A maioria dos inversores autocomutados 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).

Os inversores para sistemas FV 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 FV e fazer a busca do MPP. Os capacitores de desacoplamento encontram-se em paralelo com o painel FV e também no barramento CC dos circuitos com múltiplos estágios. Os transformadores são responsáveis pela adaptação do nível de tensão e pela isolamento galvânica entre o arranjo FV e a rede elétrica, permitindo o aterramento do painel FV quando necessário. Quanto à interface com a rede elétrica, está relacionada ao modo de operação do inversor: se operando no modo

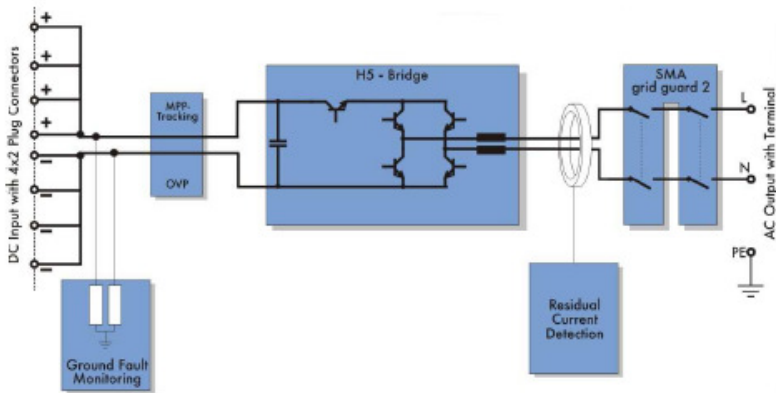
fonte de corrente (CSI – *current source inverter*) ou no modo fonte de tensão (VSI – *voltage source inverter*), além dos filtros de saída (KJAER *et al.*, 2005).

A estratégia de modulação PWM, 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 Figura 71 à 74 apresentam algumas variações dessas topologias. Cada topologia possui características próprias, o que implica em vantagens e desvantagens umas em relação às outras, por exemplo: o número de interruptores eletrônicos; necessidade de isolamento do sinal aplicado ao gatilho dos interruptores superiores da ponte (meia ponte ou ponte completa); isolamento galvânica com transformador de alta ou de baixa frequência ou até ausência de transformador; frequência de chaveamento dos interruptores; quantidade de circuitos de busca de MPP; faixa de valores da tensão CC de entrada e da tensão CC efetivamente entregue ao circuito inversor (meia ponte ou ponte completa); circuitos de proteção; entre outros.



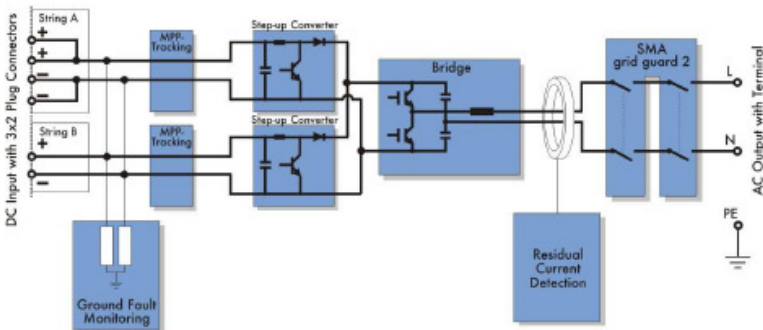
**Figura 71:** Inversor com transformador de baixa frequência.

Fonte: (SMA, 2008a)



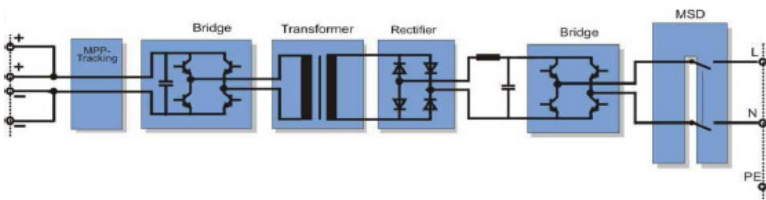
**Figura 72:** Inversor sem transformador.

Fonte: (SMA, 2008a)



**Figura 73:** Inversor sem transformador e *multi-string*.

Fonte: (SMA, 2008a)



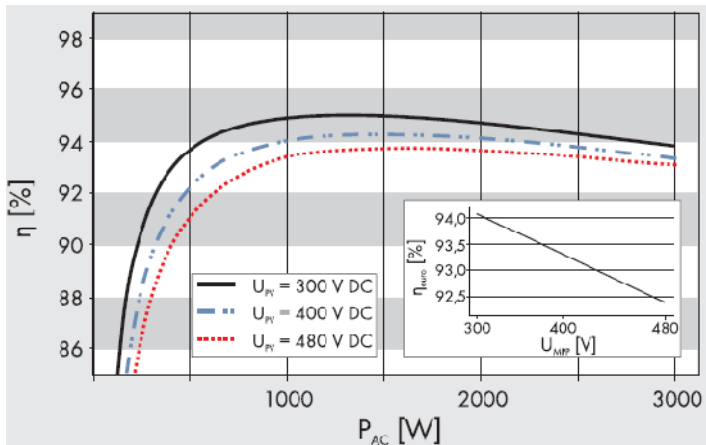
**Figura 74:** Inversor com transformador de alta frequência.

Fonte: (SMA, 2008a)

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.

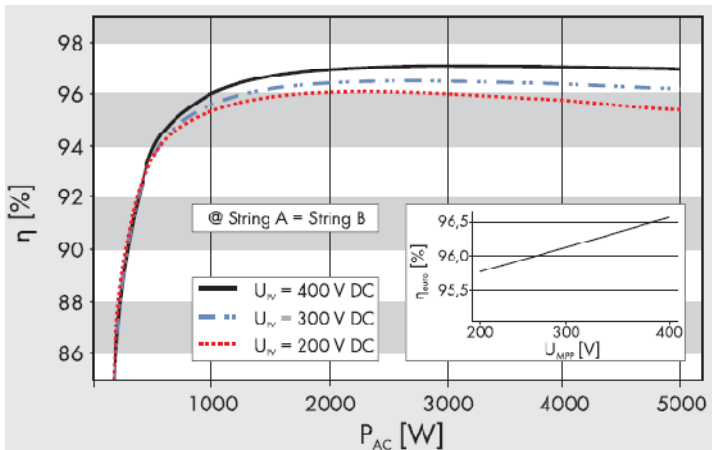
Inversores sem transformador chegam a ter cerca de 2% (absoluto) a mais de eficiência de conversão CC-CA se comparados aos inversores com transformador (HAEBERLIN, 2001).

Outros aspectos que interferem no rendimento são o percentual de potência aplicado na entrada em relação à potência nominal do inversor, e também o nível de tensão CC disponibilizado pelo arranjo FV na entrada do inversor (BAUMGARTNER *et al.*, 2007; DRIESSE *et al.*, 2008; 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 de MPP, o que interfere no desempenho global do SFCR (HAEBERLIN, 2005). A Figura 75 apresenta curvas de eficiência para o modelo de inversor da SMA SB3000 com transformador de baixa frequência (LF – *low frequency*) e a Figura 76 apresenta curvas de eficiência para o modelo de inversor SB5000TL, também da SMA, porém sem transformador.



**Figura 75:** Curvas de eficiência do inversor SMA com transformador de baixa frequência modelo SB3000.

Fonte: (SMA, 2009b).



**Figura 76:** Curvas de eficiência do inversor SMA sem transformador modelo SB5000TL.

Fonte: (SMA, 2009b).

Dependendo da topologia adotada na concepção do inversor do SFCR, tem-se um comportamento diferente em relação ao seu rendimento, dependendo do nível de tensão aplicado pelo arranjo FV. Essa característica não está relacionada apenas com a presença ou não de um transformador, pois pode-se citar o inversor da marca KACO modelo Powador 8000xi (sem transformador), que possui melhor rendimento com tensões CC na ordem de 350 V, e cujo rendimento cai cerca de 1,50% (absoluto) com tensões CC de 600 V, mesmo estando ainda dentro da faixa de operação do circuito de busca do ponto de máxima potência (PHOTON-INTERNATIONAL, 2010c).

Os inversores de SFCR podem ainda agregar funções de correção do fator de potência, atuando como filtro ativo, como no inversor monofásico de dois estágios com filtro ativo proposto em Souza e Martins (2008), que é composto no primeiro estágio por um conversor CC-CC meia ponte com comutação suave do tipo ZVS (*zero voltage switching*), com modulação PWM e busca do ponto de máxima potência, e no segundo estágio por um conversor CC-CA ponte completa, cuja estratégia de modulação e controle permite realizar também a função de filtro ativo.

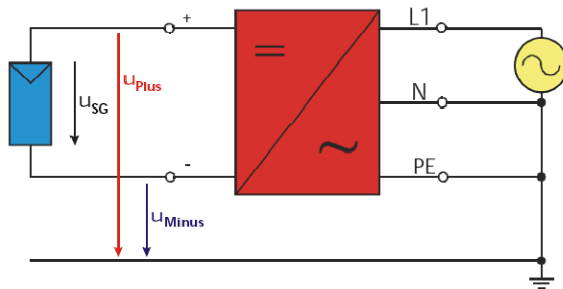
A empresa alemã SMA colocou no mercado, em meados de 2009, inversores com controle de potência reativa, nos quais é possível predeterminar um fator de potência entre 0,8 capacitivo e 0,8 indutivo (SMA, 2009b).



Quanto ao circuito de busca do ponto de máxima potência, várias técnicas podem ser empregadas. As mais usuais são: tensão constante; perturbação e observação; condutância incremental (MARTINS *et al.*, 2010).

Outro aspecto relevante a ser considerado na escolha da topologia a ser utilizada é a questão do aterramento do painel FV. Quando da necessidade de se efetivar o aterramento, seja do terminal positivo ou do terminal negativo do painel FV, o inversor deve prover a isolação galvânica entre a rede elétrica CA e o barramento CC do painel FV. O aterramento do painel FV torna-se necessário quando se utilizam módulos FV da tecnologia de filmes finos, módulos cristalinos com terminais na face traseira da célula (*back-contact cell*)<sup>7</sup> (SCHMIDT *et al.*, 2007) ou nos países em que a legislação exige o aterramento, como por exemplo nos Estados Unidos.

A Figura 77 apresenta a interligação padrão de um inversor de SFCR utilizado na Europa, onde o lado CA é aterrado e o lado CC é mantido flutuando em relação ao terra. Ao medir a diferença de potencial existente entre o polo positivo do lado CC e o terra, e entre o polo negativo do lado CC e o terra, obtém-se diferentes resultados, dependendo da topologia empregada na concepção do inversor.



**Figura 77:** Inversor de SFCR com o lado CC flutuando em relação ao terra.

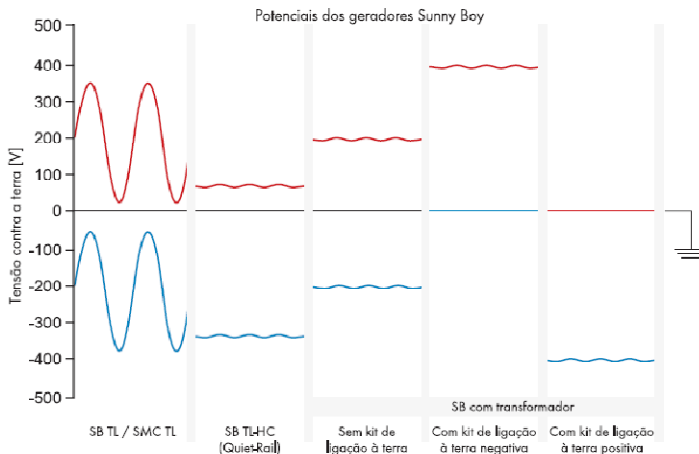
Fonte: (SCHMIDT *et al.*, 2007).

Na Figura 78 é apresentado um resumo com as formas de onda das tensões encontradas no lado CC em relação ao terra, para cinco diferentes situações. A linha superior (vermelha) representa a tensão entre o polo positivo e o terra, e a linha inferior (azul) representa a tensão entre o polo negativo e o terra. Analisando as curvas da esquerda

<sup>7</sup> Um fabricante que utiliza essa tecnologia é o SUNPOWER, e seus módulos FV possuem rendimento na faixa de 18%.

para a direita, tem-se que: a primeira é obtida em inversores sem transformador; a segunda também em inversores sem transformador, porém com o circuito *boost* de entrada do tipo assimétrico que trabalha com tensões de entrada elevadas ( $\approx 700 V_{CC}$ ); a terceira em inversores com transformador onde o lado CC está fluuando; e a quarta e quinta em inversores também com transformador e aterramento do polo negativo e positivo, respectivamente.

Se células do tipo *back-contact* forem mantidas sem aterramento, surgirá o efeito de polarização, que é o carregamento estático na superfície da célula, aumentando a taxa de recombinação dos portadores de fotocorrente, o que reduz o rendimento da conversão fotovoltaica. Para evitar esse efeito de polarização, o terminal positivo do arranjo FV deve ser aterrado. Já os módulos de filmes finos, principalmente a-Si e CdTe, ao operarem sem o aterramento no lado CC, podem apresentar corrosão na camada do TCO (*transparent conductive oxide*), reduzindo o rendimento da conversão fotovoltaica. Essa corrosão ocorre pela reação do sódio presente na camada da cobertura de vidro, com a umidade. Para evitar esse problema, pode-se selar as bordas dos módulos, impedindo a entrada de umidade, ou adotar o método mais recomendado que é o aterramento do polo negativo do arranjo fotovoltaico, o que provoca um campo elétrico e os íons de sódio carregados positivamente são afastados da camada de TCO (SMA, 2009c).



**Figura 78:** Tensão no lado CC, sem e com aterramento.

Fonte: (SMA, 2009b).

Portanto, dependendo da tecnologia do módulo utilizado, para evitar a redução na sua eficiência ou até mesmo sua degradação, existem casos onde é necessário o uso de inversores com transformador e efetuar o aterramento do pólo (positivo ou negativo), conforme a recomendação do fabricante do módulo.

### 3.1 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A discussão sobre a qualidade da energia elétrica pode, em um primeiro momento, estar focada nas questões de continuidade do serviço, mas à medida que equipamentos mais sofisticados são utilizados no cotidiano, outros fatores que influem na formação da forma de onda de energia elétrica passam a ser relevantes, pois a energia elétrica com baixa qualidade pode inviabilizar o funcionamento normal de diversos equipamentos eletroeletrônicos.

Pode-se denominar “distúrbios” uma série de fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica, que vão desde problemas na continuidade do fornecimento; níveis de tensão; oscilações de tensão e de frequência; distorções harmônicas na tensão e na corrente; interferência eletromagnética irradiada e conduzida; entre outras.

Os problemas de continuidade do fornecimento são os mais perceptíveis quando da sua ocorrência; porém, normalmente estão fora do controle do consumidor, a menos que este possua sistemas ininterruptos de energia como *no breaks* e grupos motor-gerador.

Quanto aos níveis de tensão disponibilizados aos consumidores, existem faixas de valores diferenciadas dependendo se o consumidor é alimentado em alta, média ou baixa tensão (ANEEL, 2001). Valores de tensão que estejam fora da faixa estabelecida, seja acima ou abaixo, são chamados de sobretensões (*swell*) ou subtensões (*sag*), e podem ser de curta duração (< que 1 minuto) ou de longa duração (> que 1 minuto) (SCHNEIDER, 2003).

As distorções harmônicas na tensão e principalmente na corrente são devidas ao surgimento de frequências harmônicas junto à onda fundamental. Os harmônicos de ordem ímpar são os mais significativos e, quando sobrepostos às ondas de tensão e/ou de corrente fundamentais, provocam sua distorção. Estas frequências, múltiplas ímpares da fundamental em 60 Hz (180 Hz; 300 Hz; 420 Hz; 540 Hz; etc.), surgem

devido ao acionamento de cargas não lineares<sup>8</sup>. Os harmônicos pares não são considerados por apresentarem amplitude desprezível, mesmo os de baixa ordem. Ao se medir a amplitude das frequências múltiplas da fundamental e estabelecer uma relação percentual destas amplitudes em relação à fundamental, tem-se a influência individual de cada harmônico, e o conjunto dessas influências representa a distorção harmônica total (THD) (AIELLO *et al.*, 2006; CHICCO *et al.*, 2009). A distorção harmônica total é vista em relação à corrente (THDi) ou em relação à tensão (THDv), e é dada pelas Equações (1) e (2) a seguir.

$$THDi = \frac{\sqrt{I_2^2 ef + I_3^2 ef + I_4^2 ef + \dots + I_n^2 ef}}{I_1 ef} \quad (1)$$

$$THDv = \frac{\sqrt{V_2^2 ef + V_3^2 ef + V_4^2 ef + \dots + V_n^2 ef}}{V_1 ef} \quad (2)$$

Interferências eletromagnéticas irradiadas e conduzidas são geradas normalmente a partir do chaveamento de interruptores eletrônicos operando em alta frequência, tais como: transistor bipolar de junção (TBJ); transistor de efeito de campo (FET); transistor bipolar de gatilho isolado (IGBT). A interferência eletromagnética irradiada por um equipamento eletroeletrônico é minimizada fazendo-se uma blindagem em volta do circuito eletrônico gerador da interferência. Isso é conseguido revestindo o gabinete do equipamento com material metálico e aterrando essa blindagem. Já a interferência eletromagnética conduzida deve ser minimizada com a adição de filtros eletrônicos formados por indutores, capacitores e resistores, sintonizados na frequência da interferência.

---

<sup>8</sup> Cargas não lineares são cargas onde a corrente não evolui linearmente com a forma de onda da tensão (e.g. retificador com filtro capacitivo).

### 3.1.1 Inversores utilizados em sistemas FV e a qualidade da energia elétrica

A forma de onda da tensão e da corrente dos inversores utilizados em SFCR deveria ser senoidal com baixa distorção. Entretanto, isso não ocorre de maneira ideal. Existe o aparecimento de frequências harmônicas, principalmente na corrente. Quanto mais se opera próximo da potência nominal do inversor, menor é a distorção harmônica verificada (HUDSON *et al.*, 2002; MACÊDO e ZILLES, 2009; 2005; RAMPINELLI *et al.*, 2008; SIDRACH-DE-CARDONA e CARRETERO, 2005).

Por outro lado, existem limites de operação dos inversores comerciais, atrelados aos parâmetros elétricos da rede ao qual o inversor é conectado. A SMA, tradicional fabricante de inversores para sistemas FV, estipula valores limites quanto a: nível de tensão; frequência da rede e impedância da linha (SMA, 2008b; 2005).

A forma de onda obtida na saída dos inversores de SFCR deve possuir baixa distorção harmônica. A distorção harmônica total da corrente (THDi) deve ser menor que 5% da corrente fundamental e cada harmônico individual deve estar limitado conforme apresentado na Tabela 2 (IEC-61727, 2004; IEEE-519, 1992; IEEE-929, 2000).

**Tabela 2:** Limites de distorção na corrente.

<b>Ordem dos harmônicos</b>	<b>Limite de distorção</b>
3 <sup>a</sup> – 9 <sup>a</sup>	< 4,0%
11 <sup>a</sup> – 15 <sup>a</sup>	< 2,0%
17 <sup>a</sup> – 21 <sup>a</sup>	< 1,5%
23 <sup>a</sup> – 33 <sup>a</sup>	< 0,6%
Acima da 33 <sup>a</sup>	< 0,3%

Fonte: Adaptado de IEEE-929 (2000) e IEC-61727 (2004)

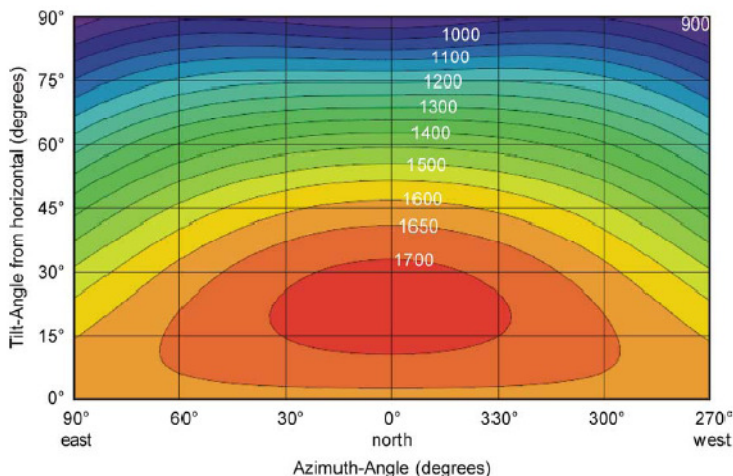
## 3.2 INTEGRAÇÃO DE GERADORES SOLARES AO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A geração de energia elétrica junto ao ponto de consumo é uma característica bastante interessante. Este é o princípio da geração distribuída (GD), e leva à redução das perdas nos sistemas de transmissão e distribuição (T&D). Esta GD integrada à envoltória das

edificações é possível porque os módulos FV são fabricados para serem utilizados por muito tempo em ambientes externos, sob diversas condições climáticas (RÜTHER, 2004b; SANTOS *et al.*, 2008). Deste modo, tem dupla função ao gerar eletricidade e também servir como elemento arquitetônico de vedação. Para que tenham melhor aplicação aos telhados, paredes ou janelas, a indústria vem desenvolvendo uma série de produtos destinados a estes fins.

Para aplicação em coberturas podem ser utilizados os módulos rígidos convencionais com simples instalação sobre a cobertura existente. Mas para maior integração existem módulos flexíveis que podem ser colados sobre coberturas metálicas, de concreto ou de outros diversos materiais. Existem ainda algumas tecnologias de módulos sobre telhas de vidro, que substituem totalmente as telhas convencionais. A utilização em vedações semitransparentes pode ser feita através dos módulos aplicados sobre vidro sem moldura. A instalação é feita como as de panos de vidros comuns, mas pelo espaçamento entre as camadas de material FV, é controlado o nível de luz natural que passará ao interior da edificação. Em fachadas com vedações opacas, as aplicações são as mais diversas. Cabe ao projetista optar pela que melhor se integra ao projeto arquitetônico (RÜTHER, 2004b; SANTOS *et al.*, 2008).

Um SFCR instalado no hemisfério sul, possui orientação ideal voltado para o norte e com inclinação correspondente à latitude local. Porém, qualquer superfície externa da edificação livre de sombras pode receber módulos FV. Recomenda-se que os módulos FV sejam instalados em locais onde recebam pelo menos 80% da irradiação máxima anual do local (CHIVELET e SOLLA, 2010). A Figura 79 apresenta os valores totais de irradiação anual na cidade de Florianópolis para diferentes orientações e inclinações.



**Figura 79:** Irradiação anual (kWh/m<sup>2</sup>) para a cidade de Florianópolis.

Fonte: (BURGER e RÜTHER, 2006)

Diversas formas de integração de SFCR às edificações são possíveis. A Figura 80 ilustra os tipos mais comuns de edificações solares.

Existe ainda uma diferenciação quanto à utilização dos painéis FV na edificação. Eles podem ser empregados desde a concepção arquitetônica da edificação, utilizando os módulos FV como elementos que podem inclusive substituir outros materiais nas coberturas e nas fachadas opacas ou de vidro, o que caracteriza um sistema BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*), ou podem também ser aplicados em uma edificação já existente, o que caracteriza um sistema BAPV (*Building Applied Photovoltaic*).

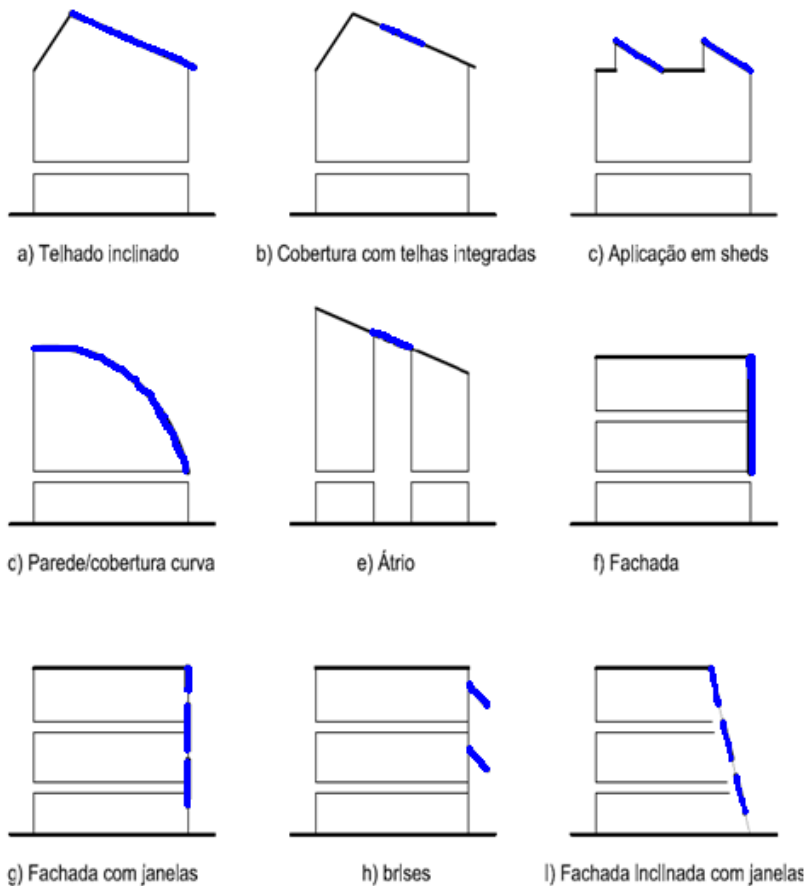


Figura 80: Tipos de edificações solares.

Fonte: (SANTOS, 2009)



## 4 METODOLOGIA

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presente tese 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, fazendo uso do método hipotético dedutivo. Esse método consiste em testar a hipótese em diferentes condições, eliminando os erros para obter a indicação verdadeira dos fatos (JUNG, 2004; RAUEN, 2002).

No procedimento para a execução desse método, foram utilizadas ferramentas de pesquisa experimental, operacional e estudo de caso (JUNG, 2004). Parte do desenvolvimento da pesquisa ocorreu no Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da UFSC e parte em campo, fazendo uso de algumas das instalações FV descritas no item 2.2.1. No estudo de caso foi investigada a qualidade de energia no ponto de conexão do SFCR na indústria Zeppini em São Bernardo do Campo – SP, onde os inversores do SFCR não se conectaram à rede elétrica, necessitando de uma série de ações para a entrada em operação do gerador FV. Durante a pesquisa, foi identificado ainda que o SFCR do aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, que no momento da instalação operou normalmente, após alguns meses de operação também necessitou de análises e ações para melhorar seu desempenho, devido a fatores relacionados à qualidade da energia no ponto de conexão.

Quanto à técnica de coleta de dados para a análise da interação entre os SFCR e os parâmetros de qualidade de energia elétrica (THDv, THDi, tensão e frequência), foram realizadas medições no ponto de conexão com a rede em diversos sistemas FV instalados no Brasil, sendo essas medições realizadas com os sistemas FV gerando energia e desligados, além de ensaios em laboratório. Foi também analisado o funcionamento de inversores conectados a sistemas onde a rede elétrica é formada a partir de geradores a diesel e a gasolina.

As medições do conteúdo harmônico da tensão e da corrente, da amplitude de tensão e da frequência, no ponto de conexão, 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 multicristalino;

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

Os inversores para SFCR disponíveis para o desenvolvimento dos ensaios foram:

- WÜRTH 650 W;
- WÜRTH Solar Star 1.200 W;
- WÜRTH Solar Star 1.500 W;
- SMA SB1100;
- SMA SB2500;
- SMA SB4000US;
- SMA SMC6000A.

Os modelos de inversores WÜRTH ensaiados foram fabricados na década de 90; portanto, com menor grau de sofisticação. Os modelos de inversores da SMA utilizados são os atualmente comercializados. Com exceção do modelo SB4000US, que é fabricado para atender ao mercado norte americano, os demais modelos são fabricados para atender ao mercado europeu.

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 aos SFCRs que se utilizam desse modelo (quatro na UFSC / Florianópolis - SC; um no Aeroporto Hercílio Luz / Florianópolis – SC e um na Zeppini / São Bernardo do Campo – SP);
- um dos inversores instalados na UFSC encontra-se no LABSOLAR, o que permite a realização de variados ensaios em ambiente real e de laboratório;
- 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.

São apresentadas na Tabela 3 as características elétricas do inversor SB2500.

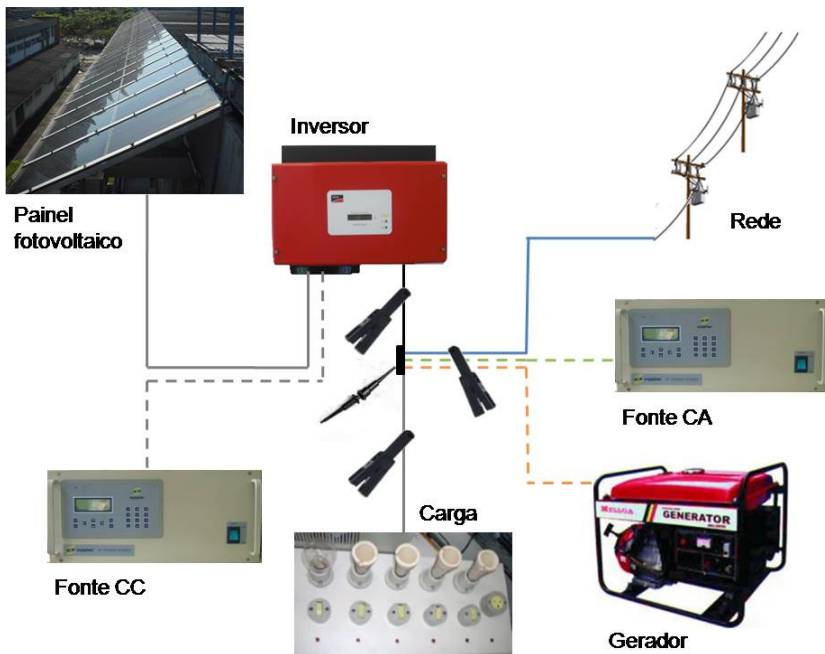
**Tabela 3:** Características elétricas do inversor SMA modelo SB2500.

Potência CC máxima	2.700 W
Tensão CC máxima	600 V
Faixa de tensão CC de entrada em MPP	224 V – 480 V
Corrente de entrada máxima	12 A
Número de circuitos de MPP	1
Potência CA máxima	2.500 W
Corrente de saída máxima	12,5 A
Faixa de tensão CA	180 V – 260 V
Tensão CA nominal	220 V – 240 V
Frequência da rede CA	50 Hz ou 60 Hz
Faixa de frequência da rede CA	± 4,5 Hz
Fator de deslocamento (cos $\phi$ )	1
Número de fases	1
Eficiência máxima	94,1%
Eficiência européia	93,2%
Topologia / isolamento	utiliza transformador de baixa frequência

Fabricantes de inversores para SFGR 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 THDv, 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.

#### 4.2 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS EM LABORATÓRIO

Para a realização de ensaios no LABSOLAR, foram realizadas diversas configurações alternando o uso entre: painel FV ou fonte CC; rede da concessionária, ou fonte CA, ou gerador a gasolina; potência da carga no ponto de conexão analisado. A Figura 81 ilustra as variações dos ensaios realizados em laboratório.



**Figura 81:** Diagrama representativo dos ensaios realizados em laboratório.

Entre os equipamentos utilizados, destaca-se uma fonte de alimentação da marca SUPPLIER de 3,5 kVA, que pode ser configurada para operar em corrente contínua (CC) com nível de tensão ajustado e corrente limitada, ou em corrente alternada (CA) onde os parâmetros que compõem a energia fornecida pela mesma podem ser alterados, como tensão, frequência, percentual de cada componente harmônica (até a quinquagésima primeira) para simular uma rede elétrica com diferentes conteúdos harmônicos.

Os ensaios realizados são focados no ponto de conexão do sistema FV com a rede elétrica, similar ao ensaio realizado por Limsakul *et al.*, (2008), no qual foram utilizadas: uma fonte CC controlada; uma fonte CA programável; um osciloscópio digital e um banco de cargas. A diferença entre os ensaios está em seus objetivos, que, nesta tese, é o de observar a qualidade de energia no ponto de conexão, e no artigo citado, é o de modelar as impedâncias envolvidas no ponto de conexão do inversor com a rede elétrica.

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 observaram-se as características quanto à qualidade da energia elétrica, com base 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.

Foi também ensaiado o funcionamento de inversores conectados a sistemas geradores a gasolina de pequeno porte, também analisando parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão com o inversor do sistema FV.

Os ensaios realizados em laboratório serviram de base para os ensaios realizados em instalações FV 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.

Ensaio 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<sub>v</sub> foi alterado para observar o limiar de operação do inversor.

Visando explorar ao máximo os ensaios em laboratório, foi construída uma bancada de testes para permitir: (i) a monitoração da tensão e da corrente (e seus respectivos conteúdos harmônicos) da rede elétrica, (ii) da saída do inversor e (iii) nas cargas. As cargas são utilizadas para analisar a parcela de energia consumida junto ao ponto de geração FV e a parcela entregue à rede elétrica. Foram realizados ensaios com cargas lineares e não lineares. A Figura 82 mostra a bancada construída para os ensaios.



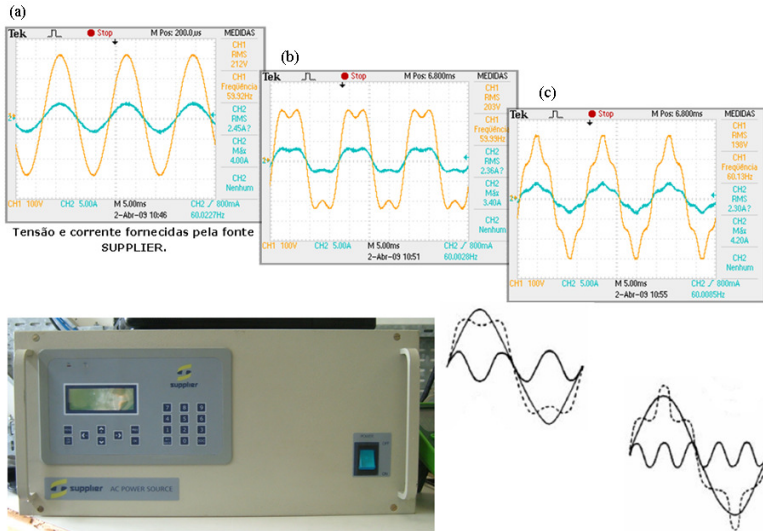
**Figura 82:** Bancada construída para ensaios em laboratório.

Para a realização de ensaios controlando-se os parâmetros de qualidade de energia, foi estabelecido contato com o fabricante de fontes de CA especiais da marca SUPPLIER para o fornecimento da fonte. Esta fonte permite que sejam alterados parâmetros da qualidade de energia fornecida pela mesma, 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 83 mostra a fonte SUPPLIER durante ensaios preliminares no LABSOLAR.



**Figura 83:** Fonte SUPPLIER conectada ao inversor SB2500 e cargas.

A Figura 84 mostra as formas de onda de tensão e corrente obtidas com o osciloscópio na saída da fonte SUPPLIER: senóide (somente a fundamental), fundamental mais o terceiro harmônico e fundamental mais o quinto harmônico, respectivamente.



**Figura 84:** Fonte SUPPLIER fornecendo: (a) onda senoidal, (b) fundamental mais terceiro harmônico e (c) fundamental mais quinto harmônico.

### 4.3 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE DADOS EM SFCR EM OPERAÇÃO

A realização de ensaios em sistemas FV 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 interativo, 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 alguns SFCRs em operação no Brasil. A aquisição dos parâmetros de qualidade de energia em campo ocorreu inicialmente nos sistemas existentes na UFSC. Na sequência, o procedimento foi estendido para os SFCRs da CELESC, ELETROSUL, TRACTEBEL e do Condomínio Pedra Branca, todos localizados em Florianópolis e região metropolitana. Posteriormente, a aquisição dos parâmetros foi feita na Indústria Zeppini, em São Bernardo do Campo – SP. Foram também realizados ensaios na minirrede híbrida FV-diesel da Vila de Araras em Nova Mamoré – RO. Os sistemas FV analisados são listados na Tabela 4.

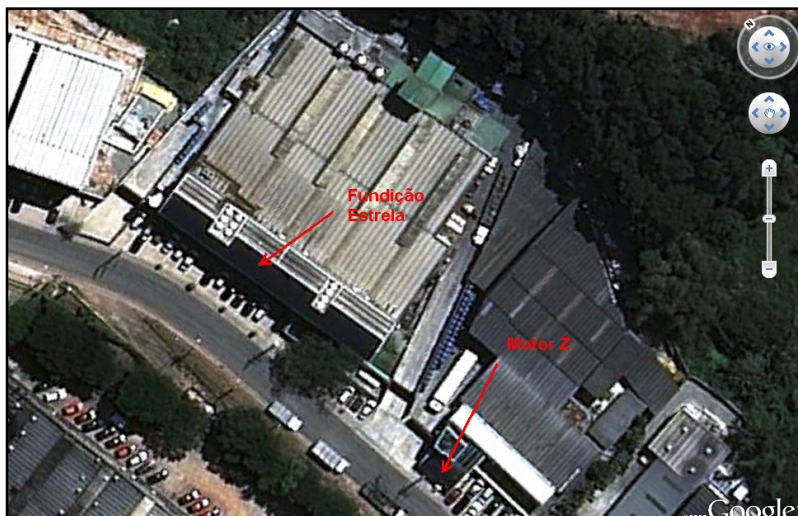
**Tabela 4:** SFCR utilizados nos ensaios de campo.

SFCR		Potência Instalada (kWp)	Tecnologia dos módulos	Marca do Inversor	Modelo do Inversor
LABSOLAR	UFSC	2,02	a-Si	SMA	SB2500
Centro de Convivência	UFSC	1,10	a-Si	2xWÜRTH	650 W
Centro de Cultura e Eventos	UFSC	10,24	a-Si	1xSMA	SB2500
				1xWÜRTH	1.500 W
				5xWÜRTH	1.200 W
CELESC (sede)		1,40	a-Si	2xWÜRTH	650 W
Casa Eficiente	ELETROSUL	2,25	m-Si	2xWÜRTH	1.500 W
ELETROSUL (sede)		11,97	a-Si	3xSMA	SB4000U
Hospital Universitário	UFSC/ TRACTEBEL	1,99	$\mu$ -Si	SMA	SB2500
Colégio de Aplicação	UFSC/ TRACTEBEL	1,99	$\mu$ -Si	SMA	SB2500
Aeroporto Hercílio Luz	UFSC/ TRACTEBEL	2,12	$\mu$ -Si	SMA	SB2500
Condomínio Pedra Branca		6,40	a-Si	SMA	SMC6000A
Motor Z	Grupo Zeppini	2,45	a-Si	2xSMA	SB1100
Fundição Estrela	Grupo Zeppini	14,69	a-Si	1xSMA	SB2500
				2xSMA	SMC6000A
Araras	Híbrido FV-diesel	20,48	a-Si	32xWÜRTH	650 W

O sistema FV instalado na Fundição Estrela, pertencente ao Grupo Zeppini, motivo do estudo de caso, recebeu especial atenção visto que a sua entrada em operação não foi, a princípio, possível de ser realizada como previsto inicialmente. Índícios apontaram como sendo a baixa qualidade da energia elétrica o fator preponderante que impediu a operação desse sistema. As medições realizadas posteriormente, e apresentadas no capítulo seguinte, confirmaram essa hipótese, visto que a forma de onda de corrente era bastante distorcida, conseqüentemente, com alto conteúdo harmônico. O mesmo só entrou em operação quando o ponto de conexão foi alterado do previsto inicialmente na edificação da Fundição Estrela, para outro ponto na edificação da Motor Z, um prédio vizinho também pertencente ao Grupo Zeppini, e com



fornecimento de energia individualizado. A Figura 85 mostra a localização dos painéis FV das duas empresas.



**Figura 85:** Localização dos painéis FV da Fundição Estrela (14,69 kWp) e da Motor Z (2,45 kWp).

Os ensaios em campo, assim como os realizados em laboratório, visam analisar a interação entre os inversores de SFGRs e a qualidade da energia elétrica entregue à carga. Esses ensaios referem-se basicamente à medição dos parâmetros de qualidade da energia elétrica com o sistema FV em operação e desligado.

Visando padronizar os ensaios em campo, foi elaborado um roteiro de medições. O número de aquisições das formas de onda de tensão e corrente e de seus respectivos THD para cada inversor foi estabelecido conforme descrito no item 3.4. Estas ações possibilitaram maior clareza na análise comparativa entre os diversos inversores ensaiados.

#### 4.4 MÉTODO ESTATÍSTICO PARA DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA

Visando identificar a quantidade de medições do parâmetro THD<sub>v</sub> necessária para caracterizar a rede elétrica, com e sem a presença de um gerador FV, foi realizada uma sequência de doze medições consecutivas no SFGR do LABSOLAR / UFSC (com e sem o inversor

conectado à rede elétrica). A Tabela 5 apresenta os valores de THDv obtidos.

**Tabela 5:** Amostra dos valores de THDv (%), com e sem FV para o SFCR da LABSOLAR / UFSC que utiliza o inversor SB2500.

<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
THDv (c/ FV)	2,70	2,61	2,74	2,74	2,73	2,75	2,71	2,74	2,73	2,76	2,74	2,81
THDv (s/ FV)	2,70	2,67	2,74	2,68	2,80	2,82	2,74	2,73	2,73	2,78	2,80	2,78

Essas medições foram realizadas em dias úteis, em horário compreendido entre as 10 e as 14 horas<sup>9</sup>, em dias de céu claro e com irradiância superior a 700 W/m<sup>2</sup>. Essas condições buscam homogeneidade no padrão de consumo da rede elétrica; ou seja, que não exista alteração significativa das cargas elétricas conectadas à rede elétrica na qual estão sendo realizadas as medições, e com relação ao nível de irradiância mínima. O objetivo é garantir que os inversores analisados estejam processando um percentual elevado de potência, em relação à sua potência nominal, pois, de acordo com Rampinelli *et al.* (2008), a THDi injetada na rede elétrica aumenta quando a potência processada pelo inversor é baixa em relação à sua potência nominal.

Inicialmente foi feita a verificação da existência de valores espúrios. Para isso calcula-se a média dos valores amostrados e seu desvio padrão.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= 2,730 & S &= 0,047 & & \text{(c/ FV)} \\ \bar{x} &= 2,748 & S &= 0,049 & & \text{(s/ FV)} \end{aligned}$$

Os valores testados quanto à existência de espúrios foram as segundas amostras ( $N_2$ ), com FV ( $N_2=2,61$ ) e sem FV ( $N_2=2,67$ ). Calculou-se o resíduo ( $ri$ ) e comparou-se com o valor obtido na tabela de Valores Extremos (ANEXO A). A Equação (3) foi usada para o cálculo do resíduo.

$$ri = \left| \frac{Ni - \bar{x}}{S} \right| \quad (3)$$

<sup>9</sup> Não é considerado o horário de verão.

Onde se obtém:

$$ri = \left| \frac{2,61 - 2,730}{0,047} \right| = 2,55 \quad (\text{c/ FV})$$

$$ri = \left| \frac{2,67 - 2,748}{0,049} \right| = 1,59 \quad (\text{s/ FV})$$

Como o valor máximo de resíduo admitido para 5% de significância e com um número de amostras igual a doze é 2,29 (da tabela de Valores Extremos, Anexo A), o valor 2,61, por ter apresentado um resíduo igual a 2,55, é considerado espúrio e foi retirado da amostra. Já o valor 2,67, que apresentou um resíduo de 1,59 não foi considerado espúrio.

Calculou-se novamente a média e o desvio padrão após a retirada do valor espúrio.

$$\bar{x} = 2,741 \quad S = 0,028 \quad (\text{c/ FV})$$

Em seguida calculou-se o coeficiente de variação (CV), dado pela Equação (4):

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde se obtém:

$$CV = \frac{0,028}{2,741} \cdot 100 = 1,02\% \quad (\text{c/ FV})$$

$$CV = \frac{0,049}{2,748} \cdot 100 = 1,78\% \quad (\text{s/ FV})$$

O passo seguinte foi calcular X para comparar com Xi da tabela de *Student* (Anexo B). Adotou-se o valor de “n” correspondente ao valor

$X$  imediatamente maior que o valor de  $X$  calculado. A equação 5 fornece o valor de  $X$ .

$$X = \frac{CV^2}{Er^2} \quad (5)$$

Sendo o erro relativo da estimativa ( $Er$ ) um valor comumente adotado como sendo 10% em projetos de engenharia, tem-se:

$$X = \frac{1,02^2}{10^2} = 0,0104 \quad (c/ FV)$$

$$X = \frac{1,78^2}{10^2} = 0,0318 \quad (s/ FV)$$

Da tabela de *Student*, para os valores de  $X$ , obtém-se que o tamanho mínimo da amostra que caracteriza com 95% de confiança o parâmetro TDHv é: 2 com FV, e 3 sem FV.

Este procedimento teve a finalidade de obter a quantidade de aquisições de THDv que caracterizam a rede elétrica. Para obter o THDv pelo processo convencional, analisando a energia em um dado intervalo de tempo, foram realizadas medições com o analisador de rede da marca FLUKE modelo 434, com e sem geração FV conectada à rede e com as mesmas condições já descritas (em dias úteis, em horário compreendido entre as 10 e as 14 horas, em dias de céu claro e com irradiância superior a 700 W/m<sup>2</sup>).

Definida a metodologia para os ensaios, é apresentada no capítulo seguinte parte das aquisições realizadas em laboratório e em campo, focando o ponto de conexão. As formas de onda de tensão e de corrente amostradas foram decompostas em seus harmônicos e obtidos o THDv e THDi. A análise, principalmente sobre esses parâmetros, é também apresentada e discutida, objetivando identificar os limites em que a conexão ainda se estabelece, bem como a descrição das condições de contorno aos problemas apresentados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios realizados em laboratório e em campo, foram gerados centenas de gráficos de Distorção Harmônica Total da tensão (THDv) e da corrente (THDi). Esses ensaios foram realizados nos diversos SFCRs descritos na metodologia, tanto com os inversores dos SFCRs operando, quanto desligado. Dessa forma, foi possível avaliar a condição da qualidade de energia nos pontos de conexão com e sem a influência dos sistemas fotovoltaicos.

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.

### 5.1 ENSAIOS PRELIMINARES NO SFCR DO LABSOLAR / UFSC

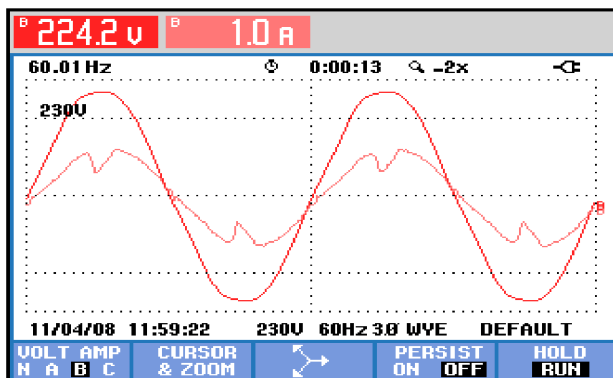
As primeiras medições realizadas, ainda com os inversores WÜRTH 650 W em operação no fim de 2008, tiveram o objetivo de fornecer as primeiras impressões quanto à qualidade da energia elétrica, tanto a fornecida pelo inversor como a presente na rede elétrica do LABSOLAR / UFSC e entregue a uma carga (linear e não linear).

Os ensaios realizados em laboratório são variações das interligações apresentadas na Figura 81.

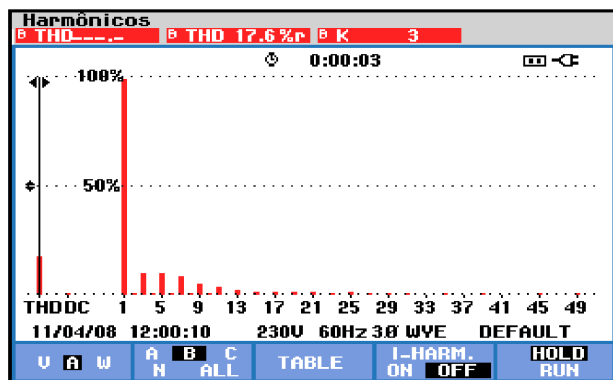
A Figura 86 mostra as formas de onda da tensão e da corrente fornecidas pelo inversor WÜRTH 650 W, para um momento com incidência solar correspondente a 35% da sua capacidade nominal, e a Figura 87 apresenta o conteúdo harmônico da corrente entregue à rede pelo inversor.

Analisando a Figura 86 é possível observar, através da forma de onda de corrente apresentada, certa distorção. Como cada fabricante/modelo de inversor para sistemas FV possui uma concepção própria, diferentes resultados quanto ao formato de onda da tensão e da corrente elétrica são esperados. Neste caso, pode-se afirmar que mesmo a rede elétrica estando com uma tensão senoidal isenta de deformações e alimentando uma carga linear na bancada de testes, o inversor do

sistema FV está injetando uma onda de corrente com certa deformação devido a presença de outras cargas ligadas ao mesmo circuito onde foi conectada a bancada de testes, e estas cargas são, na sua maioria, computadores, que são cargas não lineares e drenam corrente pulsada da rede.



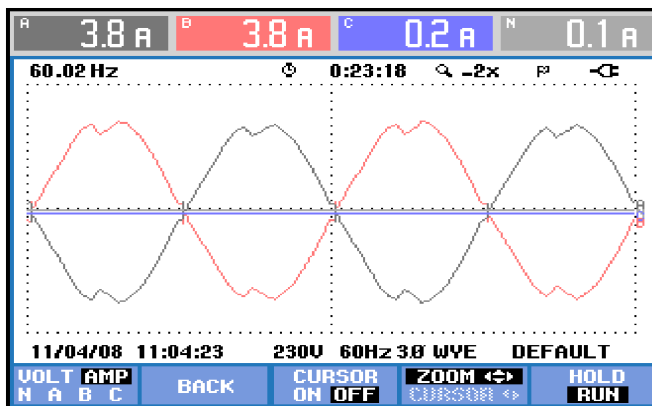
**Figura 86:** Tensão e corrente fornecidas pelo inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC com 35% da potência nominal.



**Figura 87:** Conteúdo harmônico da corrente do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC com 35% da potência nominal.

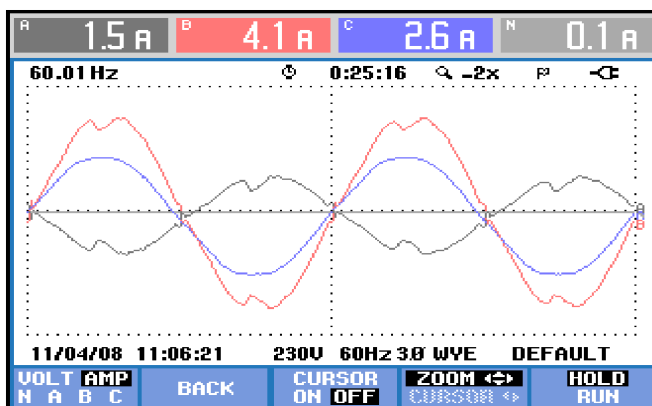
As Figuras 88 a 91 apresentam as contribuições das correntes do inversor e da rede elétrica para alimentar as diferentes cargas elétricas.

A Figura 88 mostra a situação em que toda a corrente fornecida pelo inversor é entregue à rede elétrica, visto que não há carga conectada junto ao ponto de conexão.



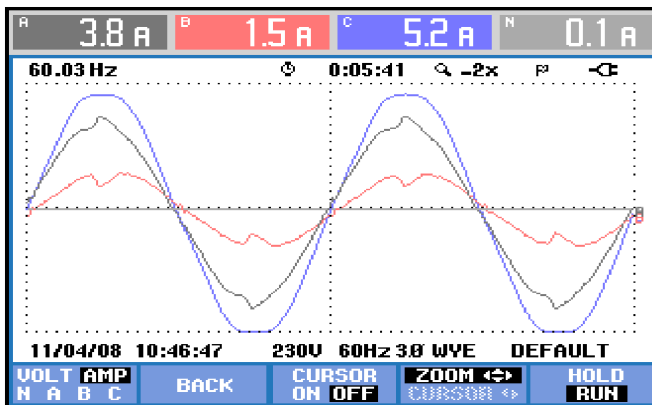
**Figura 88:** Corrente na rede (A - preto), e do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), sem carga na bancada de testes.

A Figura 89 mostra a situação em que a corrente fornecida pelo inversor é superior à corrente drenada pela carga no ponto de conexão. Portanto, apenas o excedente de energia é entregue à rede elétrica.



**Figura 89:** Corrente na rede (A - preto), do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), e na carga (C - azul).

A Figura 90 mostra a situação em que a corrente fornecida pelo inversor é inferior à corrente drenada pela carga no ponto de conexão. Portanto, a rede elétrica é responsável por fornecer o restante de energia solicitada pela carga.

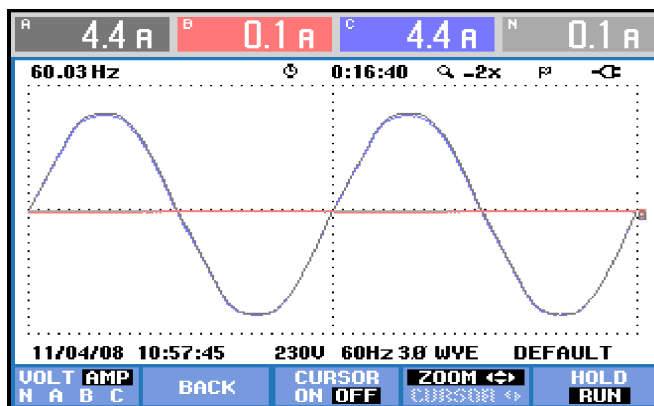


**Figura 90:** Corrente da rede (A - preto), do inversor WÜRTH do SFCR LABSOLAR / UFSC (B - vermelho), na carga (C - azul).

Fica também evidenciada a distorção que passa a surgir na corrente fornecida pela rede, uma vez que a corrente fornecida por este inversor é distorcida (devido à presença de computadores alimentados no mesmo circuito) e a corrente na carga linear (da bancada) é senoidal. Caso o inversor realizasse também a função de compensador de reativo (filtro ativo), não apareceriam distorções na corrente entregue à rede. Nesse caso, a corrente da carga é a soma da corrente instantânea da rede e da corrente fotogerada. A Figura 91 mostra a situação em que a corrente fornecida pelo inversor é nula. Portanto, a rede elétrica é responsável por fornecer toda a energia solicitada pela carga.

Como foram utilizadas cargas lineares na bancada de testes para drenar corrente da rede, pôde-se observar a ausência de distorção na corrente que circula pela carga e consequentemente na corrente fornecida pela rede.





**Figura 91:** Corrente da rede elétrica e na carga, com geração FV nula, no SFCR LABSOLAR / UFSC.

Já nas Figuras 86 a 90, a presença de distorção na corrente fornecida pelo inversor é observada, devido à presença de cargas não lineares no circuito que também alimenta a bancada de testes, o que acaba resultando em uma distorção na corrente drenada ou fornecida à rede.

Quando são utilizadas cargas não lineares também na bancada de testes, haverá componentes harmônicas na corrente da carga e, conseqüentemente, na corrente fornecida pela rede. Como observado nas figuras anteriores, a corrente fornecida pelo inversor do sistema FV apresenta uma pequena distorção no formato da corrente elétrica. Esse efeito, somado ao uso de cargas não lineares também na bancada, amplia o efeito da distorção da corrente na rede. A Figura 92 apresenta a forma de onda da tensão (senoidal) e da corrente (pulsada) em uma carga não linear e a Figura 93 apresenta o efeito no formato da corrente fornecida à rede por um gerador FV ao alimentar uma carga não linear.

Essas primeiras observações indicaram a forte relação da qualidade na energia fotogerada nos inversores analisados com a qualidade da energia já presente no circuito elétrico onde se efetua a conexão. Cabe salientar que esses ensaios foram realizados com inversores fabricados com a tecnologia disponível nos anos 90.

Caso o inversor realizasse a função também de filtro ativo, a forma de onda da corrente poderia ser corrigida.

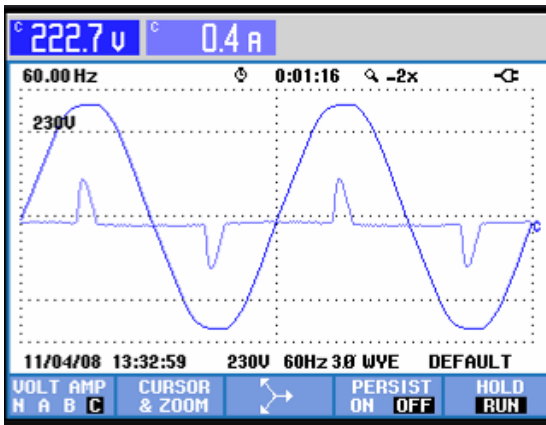


Figura 92: Tensão e corrente em uma carga não linear.

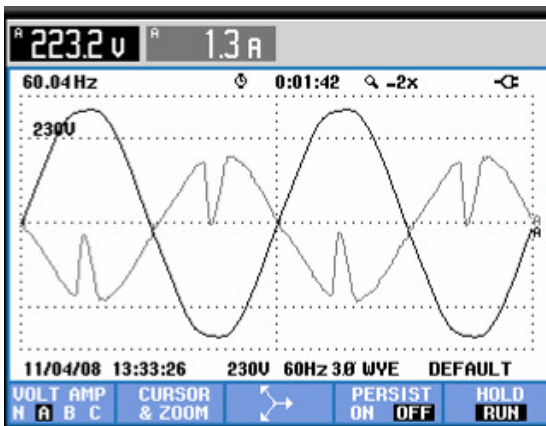


Figura 93: Tensão e corrente entregues à rede pelo inversor WÜRTH alimentando uma carga não linear.

## 5.2 ENSAIOS NO SFCR DO LABSOLAR / UFSC COM O INVERSOR SB2500

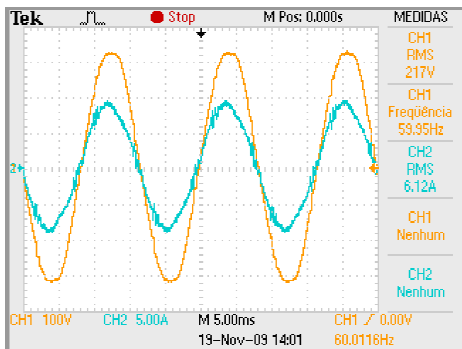
Após a substituição dos quatro inversores WÜRTH de 650 W pelo inversor SMA modelo SB2500 em novembro de 2008, uma nova fase de ensaios começou a ser realizada no SFCR de 2 kW<sub>p</sub> do LABSOLAR / UFSC.

O inversor SB2500 pertence a uma geração bem atual de inversores, com diversos recursos que permitem ajustes de seus parâmetros de operação, além de um sofisticado sistema de aquisição de dados, possibilitando o acompanhamento do seu desempenho.

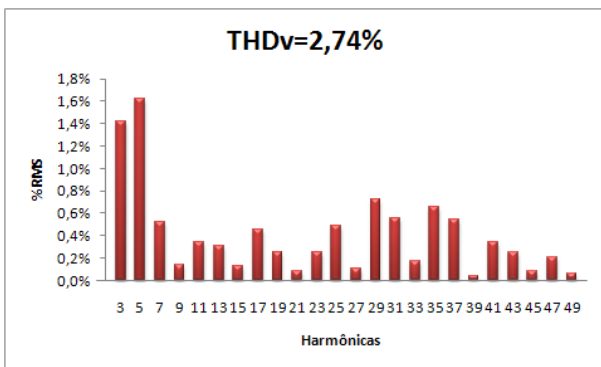
Basicamente, o ensaio consistiu em fazer a aquisição das formas de onda de tensão e de corrente no ponto de conexão, com o inversor entregando energia para a rede elétrica e, através do programa de análise de potência acoplado ao osciloscópio, foram obtidos também os espectros harmônicos da tensão e da corrente, além do fator de potência. A potência processada pelo inversor e a irradiância incidente no plano dos módulos FV também são relevantes, pois estes parâmetros estão relacionados com a qualidade da energia entregue pelo inversor. Na sequência do ensaio, o inversor foi desligado e observou-se a forma de onda da tensão no ponto de conexão e o seu conteúdo harmônico, sem qualquer influência do sistema FV.

As aquisições e gráficos do espectro harmônico, com e sem geração FV, são apresentadas para alguns dos ensaios realizados no SFCR LABSOLAR / UFSC, e nos itens seguintes para os demais SFCRs estudados neste trabalho.

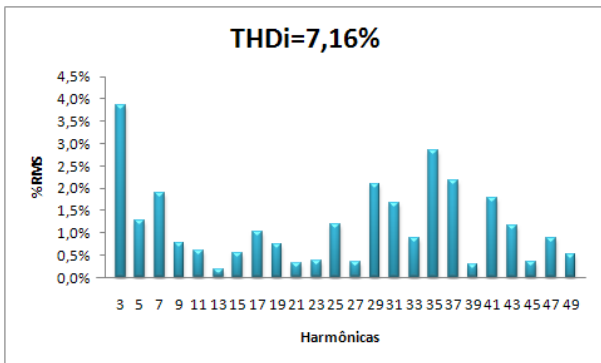
A Figura 94 mostra a tensão e a corrente no ponto de conexão do SFCR instalado no LABSOLAR / UFSC, com o inversor processando cerca de 50% da sua potência nominal. A Figura 95 apresenta o conteúdo harmônico da tensão e a Figura 96 o conteúdo harmônico da corrente.



**Figura 94:** Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC com 50% de carregamento.

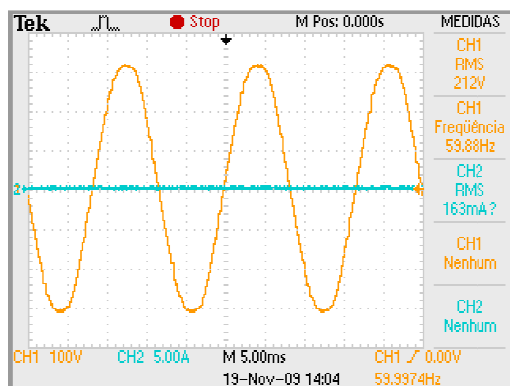


**Figura 95:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no SFCR LABSOLAR / UFSC.



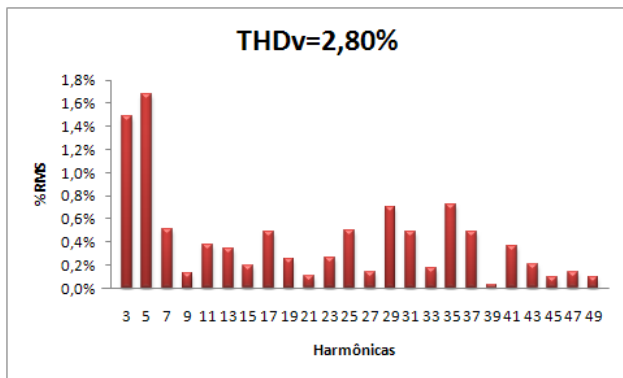
**Figura 96:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC com 50% de carregamento.

Na Figura 96, observa-se que o valor de THDi medido foi superior aos 5% previstos em norma. Porém, esse limite só é válido quando a THDv já é naturalmente menor que 2%, o que não ocorreu neste caso, conforme pode ser observado nas Figuras 97 e 98.



**Figura 97:** Tensão no ponto de conexão no LABSOLAR sem a ageração FV.

Comparando as Figuras 95 e 98 observa-se que a distorção harmônica total da tensão foi ligeiramente menor com o gerador fotovoltaico operando. Uma quantidade significativa de medições foi realizada nesta tese, e na grande maioria dos casos, essa leve tendência de melhoria foi verificada. Essa melhoria é atribuída ao fato de que, com o inversor do SFCR contribuindo com parte da energia consumida no ponto de conexão, reduz-se a corrente drenada a partir do barramento. Portanto, reduz-se a perda ao longo do circuito elétrico. Se a corrente drenada é pulsada (devido à presença de cargas não lineares), surge distorção na forma de onda da tensão. Contudo, como a corrente pulsada é suprida diretamente no ponto de conexão, a distorção na tensão é levemente reduzida. Outro aspecto relevante refere-se à amplitude da tensão no ponto de conexão, que se elevou com o inversor operando, ou seja, passou dos 212 V (sem o gerador fotovoltaico) para 217 V (com o gerador fotovoltaico). Ao considerar circuitos onde a tensão naturalmente esteja abaixo do valor nominal, existe a possibilidade de haver melhora desse parâmetro. Porém, se a tensão já estiver elevada e houver a conexão de muitos SFCRs, poderá haver sobretensão no circuito (BERTANI *et al.*, 2005; CAAMAÑO-MARTÍN *et al.*, 2008; PAATERO e LUND, 2007; THOMSON e INFELD, 2007).

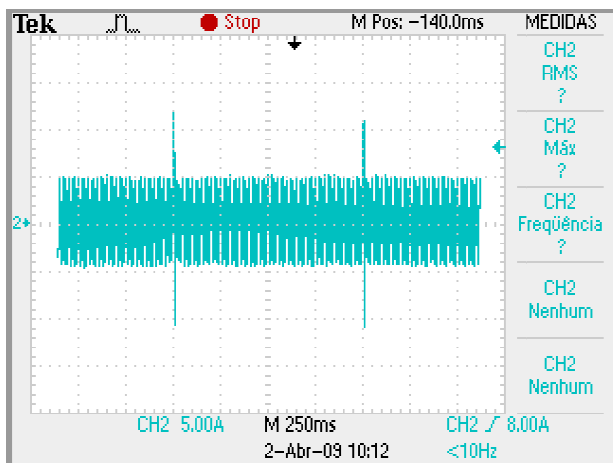


**Figura 98:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, no SFCR LABSOLAR / UFSC.

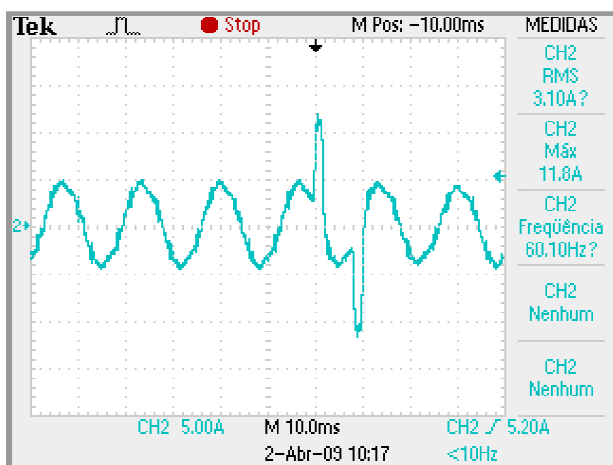
### 5.2.1 Ensaio relativo aos pulsos para medição da impedância da rede

Os inversores da SMA fabricados para o mercado europeu utilizam três métodos para garantir o desligamento do inversor em caso de falha na rede CA comercial; em outras palavras, para garantir o anti-ilhamento. O primeiro método é baseado no monitoramento da tensão da rede, o segundo no monitoramento da frequência, e o terceiro na medição da impedância da rede. Quando há uma variação acentuada na impedância entre duas medições consecutivas, o circuito lógico do inversor interpreta como uma anormalidade na rede elétrica e se desliga. As Figuras 99 e 100 mostram o pulso de corrente presente junto à corrente de saída do inversor SMA modelo SB2500 com o parâmetro de monitoramento da impedância da rede elétrica ativo.

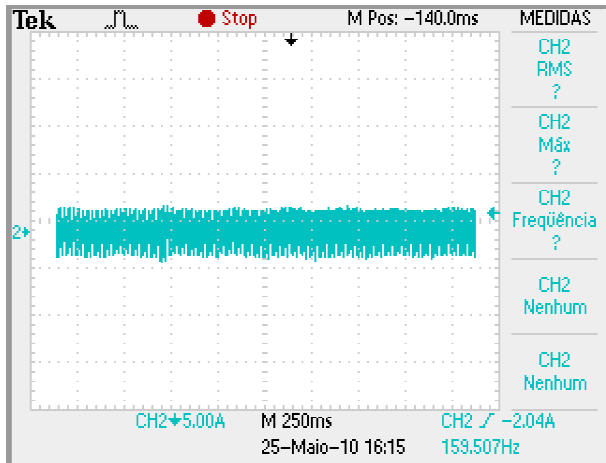
O parâmetro do inversor que permite que sejam alterados (ou até mesmo desabilitados) os pulsos de corrente que aparecem a cada um segundo é o “I-NiTest”. O valor desse parâmetro, no inversor SB2500, pode ser ajustado entre 0 e 15 A de valor de pico. Na aquisição mostrada na Figura 100, o valor estava ajustado em 12 A. A forma de desabilitar essa função é ajustar o valor do parâmetro em zero. As Figuras 101 e 102 mostram as aquisições com o parâmetro “I-NiTest” com valor zero.



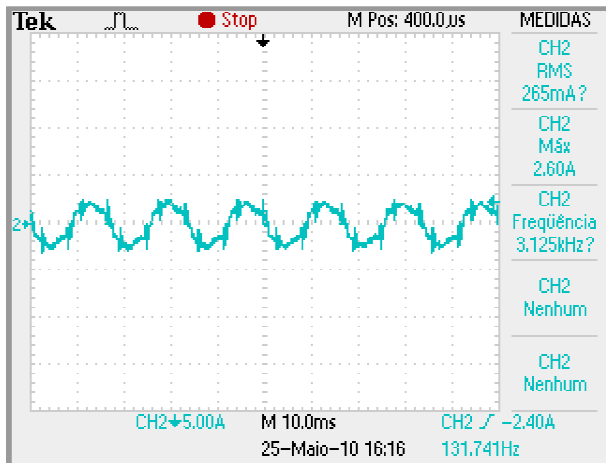
**Figura 99** – Corrente na saída do inversor SB2500 em operação no SFCR LABSOLAR / UFSC com monitoramento da impedância da rede.



**Figura 100** – Detalhe do pulso na corrente de saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC para monitoramento da impedância da rede.



**Figura 101:** Corrente na saída do inversor SB2500 em operação no SFCR LABSOLAR / UFSC sem monitoramento da impedância da rede.



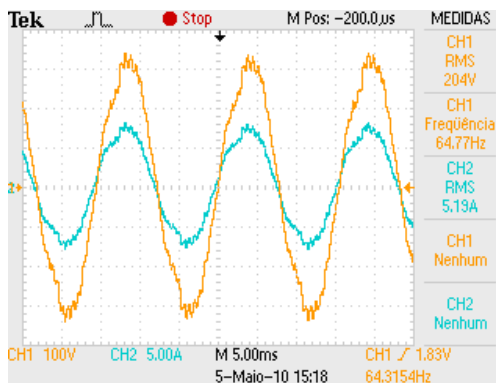
**Figura 102:** Detalhe da corrente de saída do inversor SB2500 do SFCR LABSOLAR / UFSC sem o monitoramento da impedância da rede.

### 5.2.2 Ensaios em laboratório com um gerador a gasolina de 3 kVA

Para verificar o desempenho do SFCR instalado no SFCR LABSOLAR / UFSC operando em conexão com um gerador a gasolina de pequeno porte, foi utilizado um gerador da marca GERAMAC



modelo 3000M com 3 kVA de potência, em substituição à rede elétrica. Como o gerador a gasolina não pode absorver a energia disponibilizada pelo gerador fotovoltaico, foi utilizada a bancada de cargas como sendo o ponto de conexão, e a potência das cargas deve ser superior à potência fotogerada. No ensaio preliminar, foi utilizada uma carga resistiva de 1 kW. A Figura 103 mostra a tensão e a corrente fornecidas pelo gerador<sup>10</sup> para a carga.

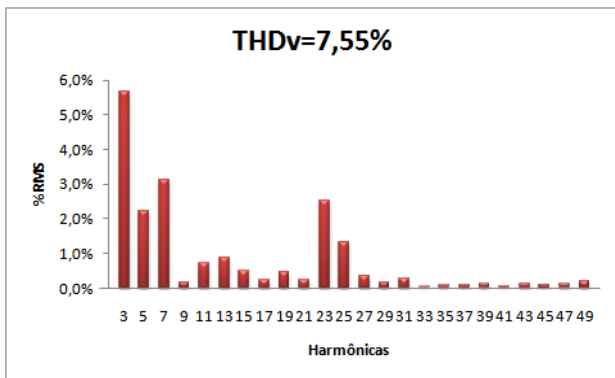


**Figura 103:** Tensão e corrente na saída do gerador a gasolina de 3 kVA alimentando uma carga resistiva de 1kW em ensaio de laboratório.

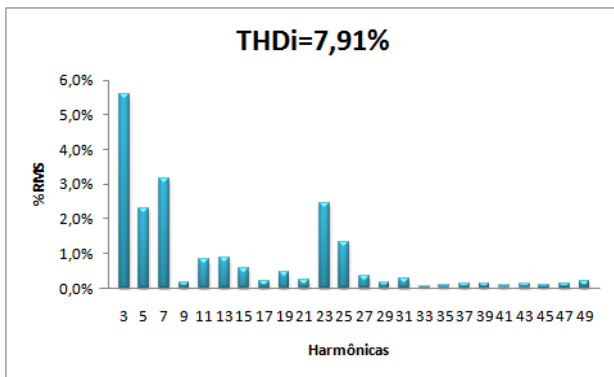
A tensão entregue pelo gerador possui elevada distorção e a distorção na corrente segue na mesma ordem de grandeza, visto que são alimentadas cargas resistivas. A Figura 104 apresenta a THDv e a Figura 105 a THDi.

Na sequência foi realizada a interligação com o inversor do SFCR LABSOLAR / UFSC (inversor SB2500). Porém, não foi possível estabelecer-se a conexão. O inversor acusou distúrbio na rede CA, mais especificamente distúrbio de impedância; ou seja, o inversor estava identificando uma situação anormal da rede. No item 5.2.1 foi apresentado o comportamento do inversor da SMA modelo SB2500 quando o mesmo estava monitorando a impedância da rede e também foi mostrado que essa função pode ser desabilitada (em detrimento a uma redundância na proteção anti-ilhamento).

<sup>10</sup> Foi utilizado um transformador 127/220V para adaptar a tensão do gerador a gasolina para 220Vca.



**Figura 104:** Componentes harmônicos da tensão entregue pelo gerador a gasolina de 3 kVA em ensaio de laboratório.



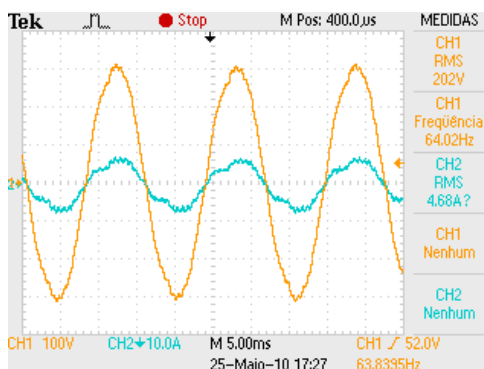
**Figura 105:** Componentes harmônicos da corrente na saída do gerador a gasolina de 3 kVA em ensaio de laboratório.

Após desabilitar o pulso de corrente que monitora a impedância da rede, o inversor passou a identificar outra anormalidade, o distúrbio de frequência. O gerador a gasolina estava entregando uma onda com frequência um pouco superior a 64 Hz, o que representa um desvio acentuado quando comparado com a rede da concessionária.

Novamente, a ação foi atuar nos parâmetros do inversor, neste caso no parâmetro “Fac-delta+” que representa o desvio em hertz para mais em relação à frequência da rede (60 Hz) em que o inversor ainda continua operando. Este valor, no entanto, para esta marca e modelo de inversor, está limitado a 4,5 Hz, o que implica na impossibilidade de conexão a uma rede cujo desvio de frequência seja superior a 4,5 Hz.

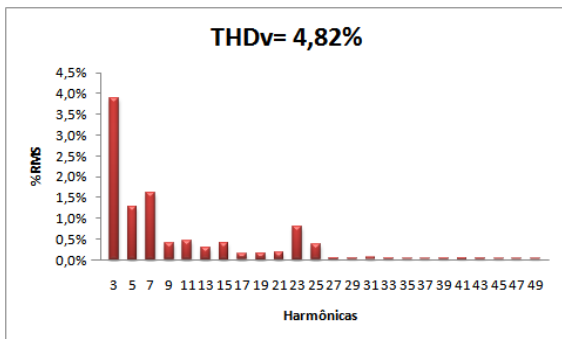
No caso do ensaio realizado, como se tratava de um gerador de 3 kVA e a carga que estava sendo alimentada era de apenas 1,0 kW, bastou aumentar a carga para além de 1,5 kW e a frequência se manteve próximo aos 63 Hz. Neste momento, a conexão com o inversor foi estabelecida, e parte da energia consumida pela carga passou a ser suprida pelo gerador fotovoltaico. Outra forma de contornar essa situação seria reduzir a aceleração do motor à combustão, evitando com a frequência do gerador se elevasse.

Para manter uma condição controlada de fornecimento de energia fotogerada, o lado CC do inversor SB2500 foi alimentado pela fonte SUPPLIER, de maneira que o inversor estava entregando 1,0 kW ao ponto de conexão e as cargas foram fixadas em 2,4 kW; ou seja, o gerador a gasolina nessa condição estava contribuindo com 1,4 kW. Foram realizadas medições de tensão no ponto de conexão e de corrente na saída do gerador, na saída do inversor e na carga. A Figura 106 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente na saída do gerador a gasolina.



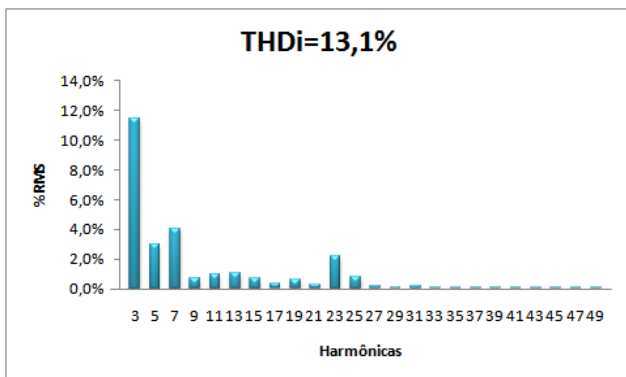
**Figura 106:** Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do gerador a gasolina com o inversor SB2500 operando.

O conteúdo harmônico da tensão é observado na Figura 107, na qual se percebe uma forte redução em relação ao valor inicial (Figura 104) sem a inserção do gerador FV.



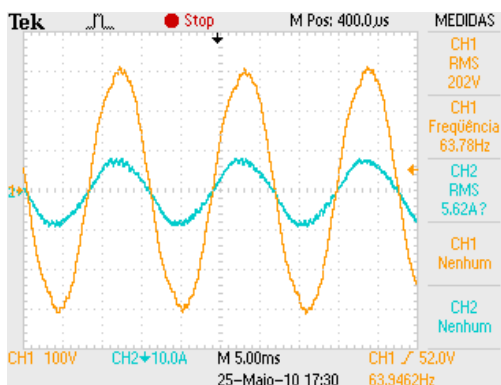
**Figura 107:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, com o gerador a gasolina e o inversor SB2500 operando.

Já o conteúdo harmônico da corrente entregue pelo gerador cresceu, conforme observado na Figura 108.

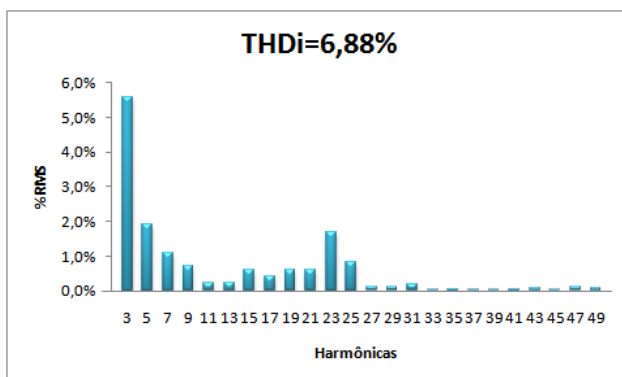


**Figura 108:** Componentes harmônicos da corrente na saída do gerador a gasolina com o inversor SB2500 operando.

A corrente fornecida pelo inversor é observada na Figura 109, juntamente com a tensão no ponto de conexão, e a Figura 110 apresenta o conteúdo harmônico dessa corrente.



**Figura 109:** Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 40% de carregamento.

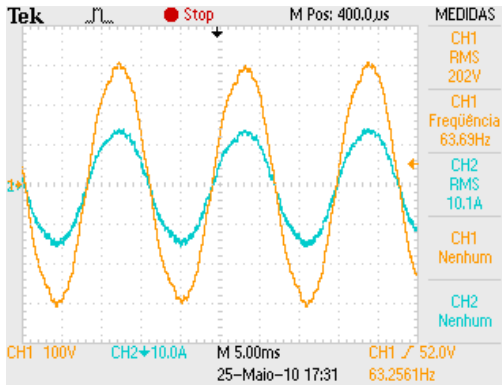


**Figura 110:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500.

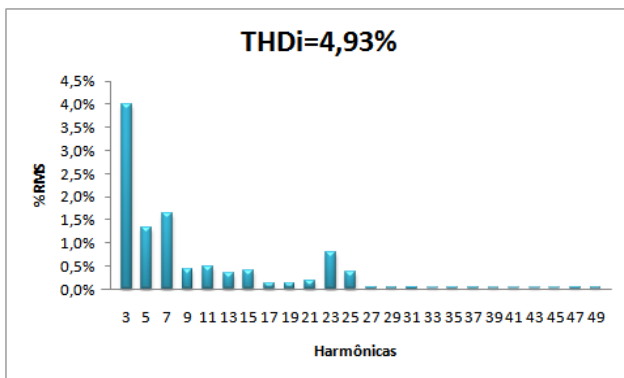
Já a tensão no ponto de conexão e a corrente drenada pela carga de 2,4 kW são apresentadas na Figura 111. O conteúdo harmônico (Figura 112) da corrente da carga, como esperado, por se tratar de uma carga linear, é da mesma ordem de grandeza do THDv no ponto de conexão.

Os ensaios realizados com o gerador a gasolina de pequeno porte demonstram a capacidade de adaptação dos inversores para SFCR modernos, permitindo através de sua parametrização estabelecer a conexão mesmo em condições diversas das ideais. Porém, deve-se atuar nos parâmetros de forma cautelosa e consciente, pois a cada alteração

abre-se mão de critérios para conexão/desconexão que podem afetar a segurança de operação do sistema elétrico.



**Figura 111:** Tensão no ponto de conexão e corrente na carga resistiva de 2.400 W, para uma rede formada pelo gerador a gasolina e pelo inversor SB2500.



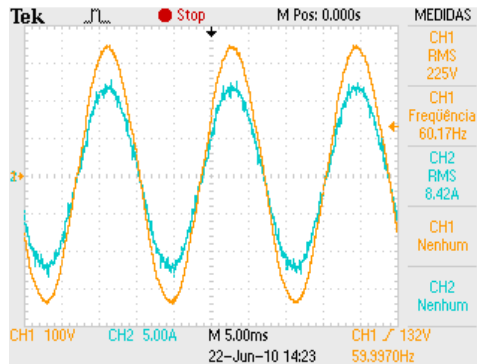
**Figura 112:** Componentes harmônicos da corrente na carga resistiva de 2.400 W, para uma rede formada pelo gerador a gasolina e pelo inversor SB2500.

### 5.2.3 Ensaios em laboratório com a fonte CA programável

Visando obter uma condição controlada do conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão, foi utilizada uma fonte de CA

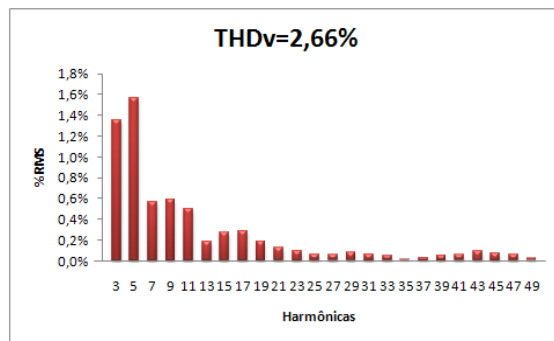
programável em substituição à rede elétrica. Inicialmente, foi disponibilizada na saída da fonte CA uma tensão, que teoricamente deveria ser formada apenas pela fundamental, e que na prática se aproxima bastante dessa situação ideal. O objetivo deste ensaio foi verificar se, após a conexão do sistema FV, ocorreria aumento ou diminuição do conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão.

A Figura 113 mostra a tensão e a corrente fornecidas pela fonte de CA programável para uma carga resistiva de 1.800 W.

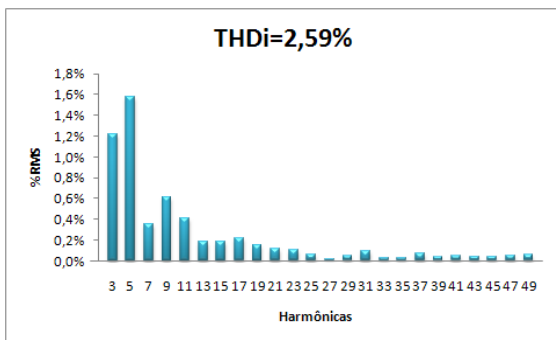


**Figura 113:** Tensão e corrente na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.

A Figura 114 mostra o conteúdo harmônico da tensão na saída da fonte de CA, e a Figura 115 o conteúdo harmônico da corrente entregue à carga resistiva de 1.800 W.



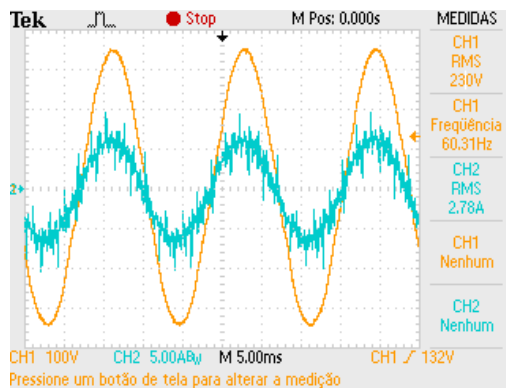
**Figura 114:** Componentes harmônicos da tensão na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.



**Figura 115:** Componentes harmônicos da corrente na saída da fonte de CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W.

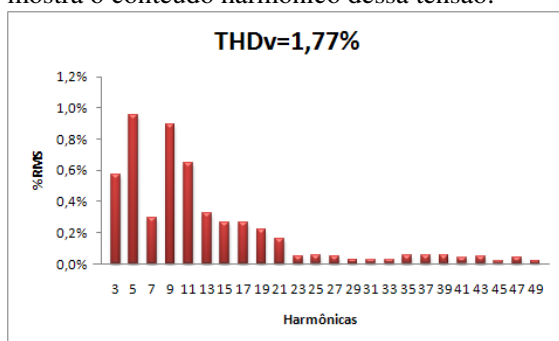
Em seguida foi realizada a conexão com o sistema FV. Essa conexão foi obtida após desabilitar os pulsos de medição da impedância da rede; ou seja, ajustando o parâmetro “I-NiTest” com valor zero. Também foram utilizados um transformador e um indutor entre a fonte de CA e o ponto de conexão, atuando como um filtro, com o intuito de minimizar surtos de corrente em alta frequência que surgiram na saída do inversor do sistema FV e que eventualmente provocavam a atuação do circuito de proteção da fonte CA, pois entre duas fontes de tensão é obrigatória a existência de um elemento indutivo para permitir o paralelismo das fontes. Solucionadas as questões quanto à conexão, verificou-se a nova condição da THDv com a inserção da geração FV. A Figura 116 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente na saída do inversor SB2500 processando cerca de 25% da sua potência nominal. Pelos motivos já expostos, foi mantida uma carga de 1.800 W, valor superior ao disponibilizado pelo gerador FV no momento do ensaio.



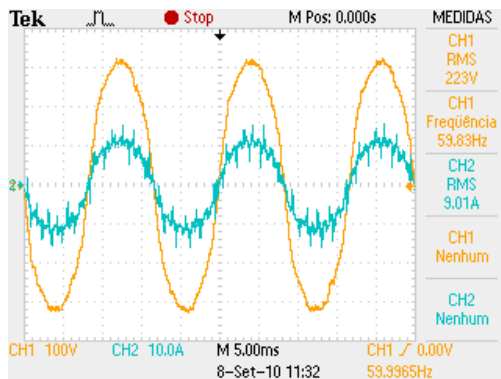


**Figura 116:** Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 25% de carregamento.

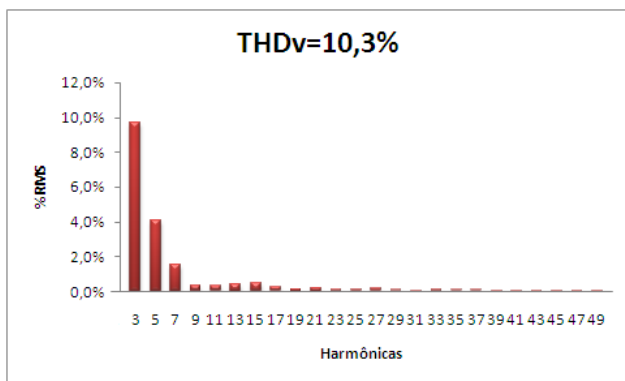
O conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão diminuiu, e é apresentado na Figura 117. Em seguida, foram inseridos diferentes conteúdos harmônicos na tensão entregue pela fonte CA programável, visando identificar o THDv limiar em que o inversor do SFCR ainda realiza a conexão. Nos ensaios em que o THDv ficou abaixo de 10%, mesmos nos casos com a presença do (i) terceiro harmônico, (ii) terceiro e quinto, ou (iii) terceiro, quinto e sétimo, a conexão com a fonte CA foi estabelecida. A Figura 118 mostra a tensão e a corrente fornecidas pela fonte CA, onde estão presentes, além da fundamental, o terceiro, quinto e sétimo harmônicos, alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, e a Figura 119 mostra o conteúdo harmônico dessa tensão.



**Figura 117:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão com a fonte CA e o inversor SB2500 operando.

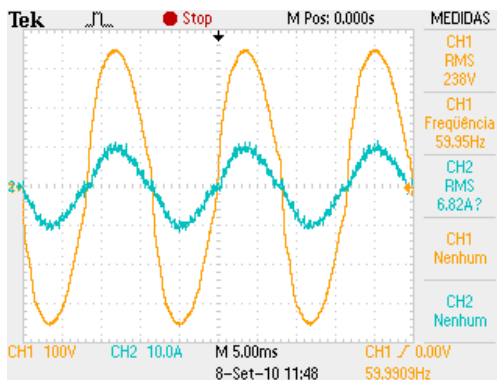


**Figura 118:** Tensão (fundamental, 3°, 5° e 7° harmônicos) e corrente na saída da fonte CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, sem o gerador FV.

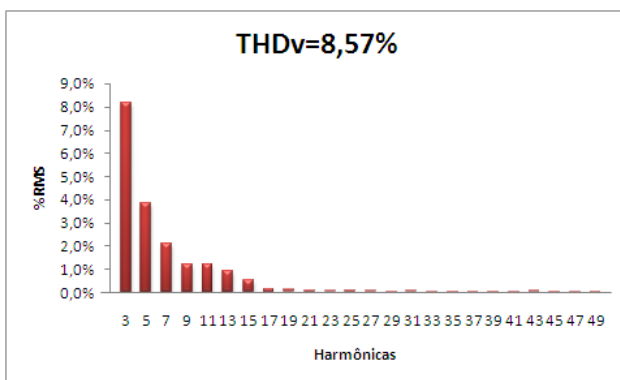


**Figura 119:** Componentes harmônicos da tensão na saída da fonte CA alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, sem o gerador FV.

Após a conexão do gerador FV, houve redução no conteúdo harmônico da tensão. A Figura 120 mostra a tensão no ponto de conexão e a Figura 121 o conteúdo harmônico dessa tensão, para o inversor processando aproximadamente 65% da sua potência nominal.



**Figura 120:** Tensão no ponto de conexão e corrente na saída do inversor SB2500 com 65% de carregamento.



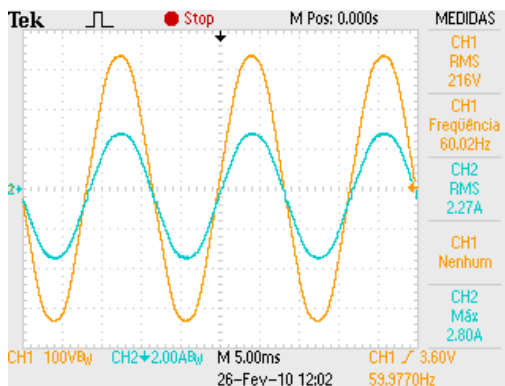
**Figura 121:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão alimentando uma carga resistiva de 1.800 W, com o gerador FV.

Para valores de THDv superiores a 10%, não se estabeleceu a conexão e o inversor acusou falha na rede CA. Tentativas de ajustar parâmetros do inversor não foram suficientes para permitir a entrada em operação do SFCR.

## 5.3 ENSAIOS NOS DEMAIS SFCR EM FLORIANÓPOLIS

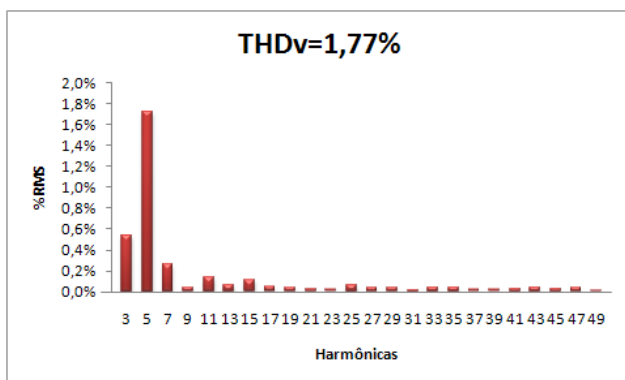
### 5.3.1 Centro de Convivência / UFSC / 1,1 kWp

O SFCR do Centro de Convivência da UFSC opera de forma satisfatória desde sua instalação no ano 2000. Ao observar a Figura 122, verifica-se um bom perfil no formato da onda da tensão no ponto de conexão e da corrente injetada na rede pelo inversor. Isso se reflete em um baixo conteúdo harmônico, tanto da tensão quanto da corrente, que podem ser observados nas Figuras 123 e 124. O inversor estava processando aproximadamente 75% da sua potência nominal no momento do ensaio, fator que contribui para que a corrente fotogerada e injetada na rede elétrica seja de boa qualidade.

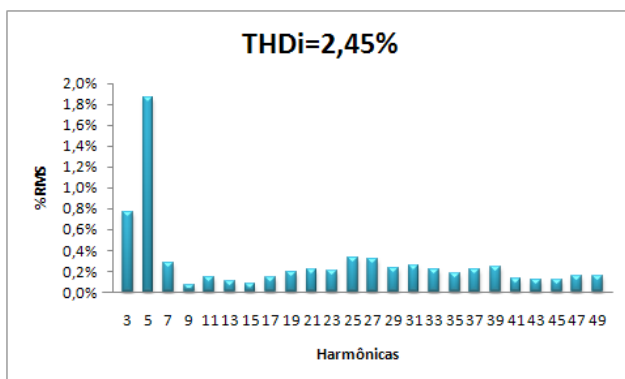


**Figura 122** – Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W do gerador FV de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC.

Apesar do inversor WÜRTH de 650 W utilizado nesse sistema ser de uma geração de inversores utilizados nos anos 90, diferentemente dos resultados apresentados no item 5.1, no qual fatores como baixa potência processada e presença de outras cargas na rede deformaram a corrente injetada pelo inversor, neste circuito e condição de operação, a corrente injetada na rede foi de boa qualidade. Quando cargas que drenam corrente pulsadas não estão presentes no circuito, o inversor do SFCR entrega uma corrente com baixo conteúdo harmônico.



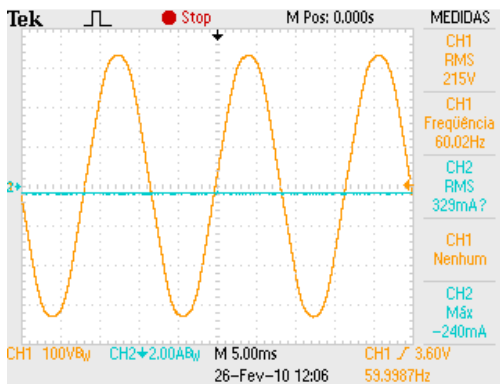
**Figura 123:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC.



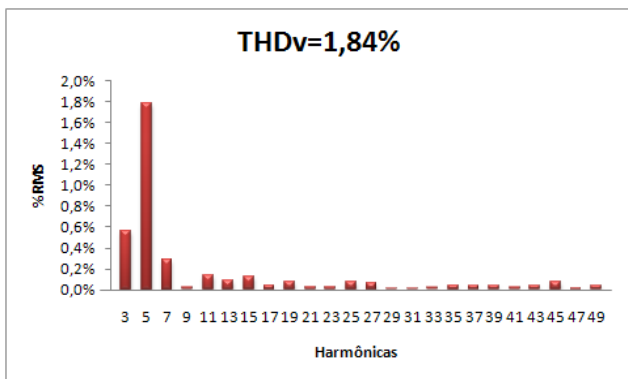
**Figura 124:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor do SFCR de 1,1 kWp do Centro de Convivência da UFSC.

Ao desligar o inversor e analisar a qualidade da tensão presente no ponto de conexão sem a influência do gerador FV, percebe-se, observando as Figuras 125 e 126, que a tensão possui baixo conteúdo harmônico.

O conteúdo harmônico da tensão sofreu redução na presença do gerador FV e a amplitude da tensão no ponto de conexão teve um leve aumento.



**Figura 125** – Tensão no ponto de conexão no Centro de Convivência da UFSC, sem o gerador FV.

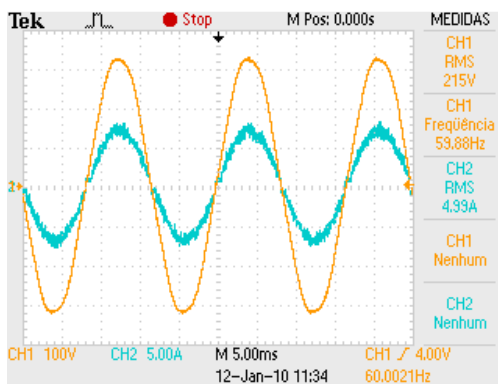


**Figura 126:** Componentes harmônicas da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, no Centro de Convivência da UFSC.

### 5.3.2 Centro de Cultura e Eventos / UFSC / 10,24 kWp

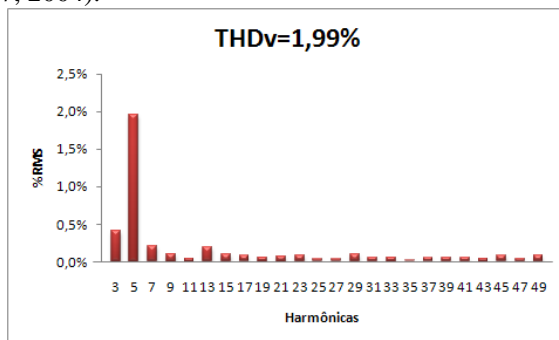
O SFCR do Centro de Eventos da UFSC é composto por sete inversores, sendo um inversor WÜRTH 1.500 W, cinco inversores WÜRTH 1.200 W e um inversor SMA SB2500. Três inversores WÜRTH estão na fase A da rede elétrica, outros três na fase B, e o inversor SMA está na fase C. Analisando a qualidade da tensão no ponto de conexão em cada uma das fases, sem o gerador FV, verificou-se o valor de THDv de 2,0%, 1,6% e 1,5%, nas fases A, B e C,

respectivamente, e os valores medidos de tensão foram de 214 V nas fases A e B, e de 211 V na fase C. São apresentadas aqui as aquisições em um inversor por fase, para descrever o comportamento da qualidade de energia nos pontos de conexão desse SFCCR. A Figura 127 mostra a tensão e a corrente na saída do inversor WÜRTH 1.500 W conectado à fase A, processando aproximadamente 65% da sua potência nominal.

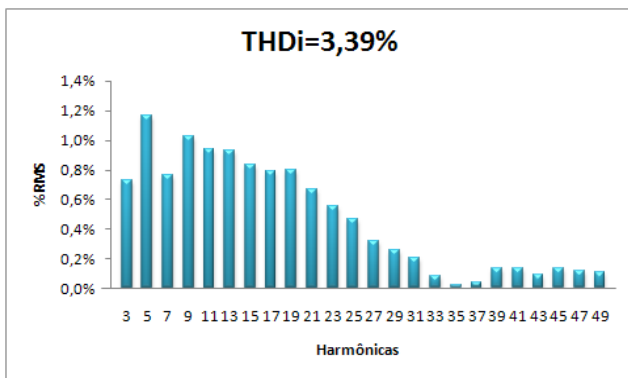


**Figura 127:** Tensão e corrente na saída do inversor WÜRTH 1.500 W do Centro de Eventos da UFSC com carregamento de 65%.

Percebe-se uma leve redução na THD<sub>v</sub>, e também um ligeiro aumento da tensão no ponto de conexão. A Figura 129 mostra o conteúdo harmônico da corrente entregue pelo inversor. Mesmo possuindo boa parte dos múltiplos ímpares da frequência fundamental até a 49ª harmônica, a THD<sub>i</sub> está abaixo dos 5% previstos em norma (IEC-61727, 2004).

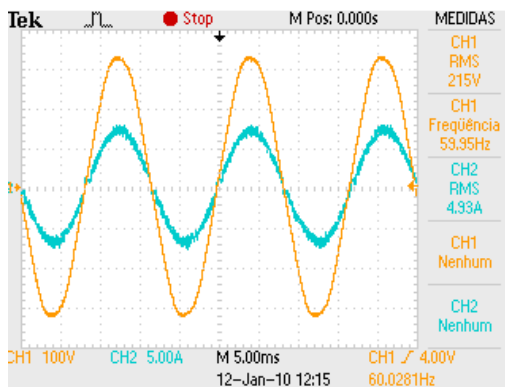


**Figura 128:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase A, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor WÜRTH 1.500 W operando.



**Figura 129:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH 1.500 W conectado na fase A, do Centro de Eventos da UFSC.

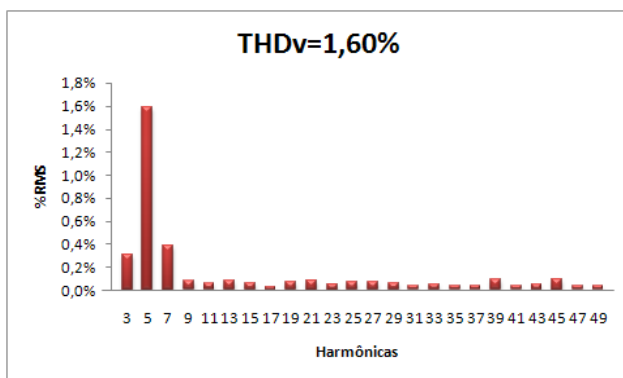
Na fase B é analisado o inversor WÜRTH 1.200 W, cuja forma de onda da tensão e da corrente é apresentada na Figura 130. O inversor está processando 75% da sua potência nominal.



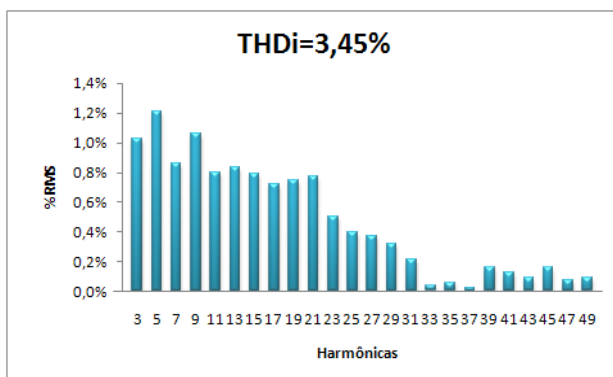
**Figura 130:** Tensão e corrente na saída do inversor WÜRTH 1.200 W do Centro de Eventos da UFSC com carregamento de 75%.

Quanto ao conteúdo harmônico da tensão na fase B, é observado na Figura 131 que o mesmo é baixo e não houve alteração em seu valor com a operação do inversor. Já o valor nominal da tensão sofreu um leve acréscimo. O conteúdo harmônico da corrente, apresentado na Figura 132, está dentro dos limites estabelecidos em norma.





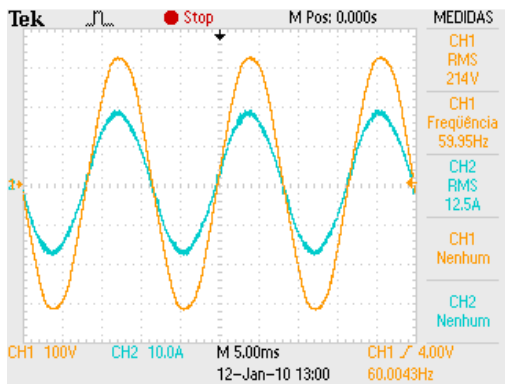
**Figura 131:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase B, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor WÜRTH 1.200 W operando.



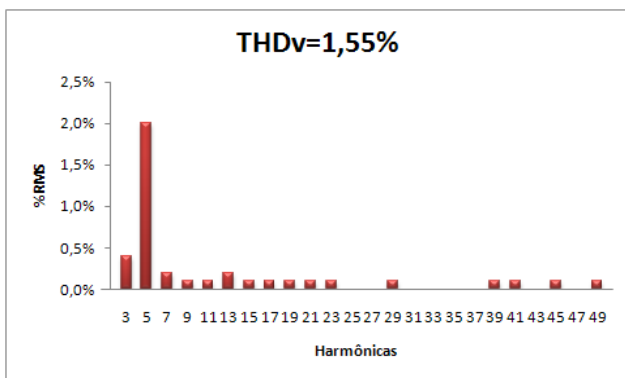
**Figura 132:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH 1.200 W conectado na fase B, do Centro de Eventos da UFSC.

Na fase C está conectado o inversor SMA modelo SB2500, cuja forma de onda da tensão e da corrente é apresentada na Figura 133. O inversor está processando 100% da sua potência nominal.

A tensão na fase C também apresentou elevação, e o conteúdo harmônico da tensão um leve aumento, conforme é observado na Figura 134. Este leve aumento é atribuído ao fato da forma de onda da tensão já estar em uma condição muito boa, e o gerador FV passa a contribuir com uma corrente no ponto de conexão que altera essa condição quase ideal da tensão sob o ponto de vista da THDv.

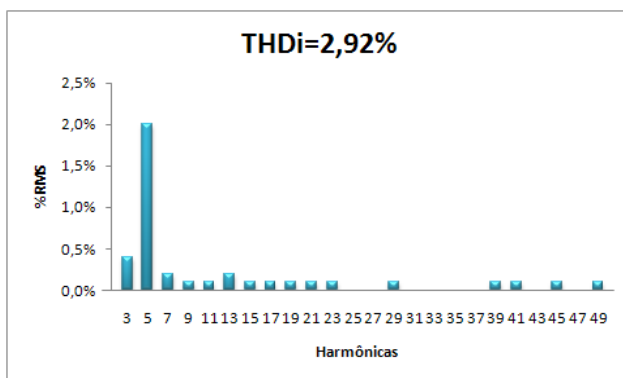


**Figura 133:** Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do Centro de Eventos da UFSC com 100% de carregamento.



**Figura 134:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão na fase C, do Centro de Eventos da UFSC com o inversor SB2500 operando.

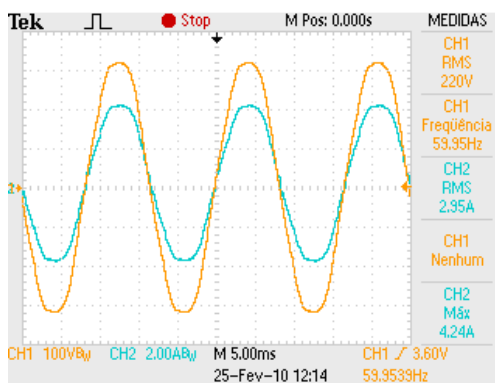
O conteúdo harmônico da corrente, mostrado na Figura 135, é baixo. Isto era esperado em função do comportamento da THDv sem o gerador FV, que naturalmente já era baixa, e também ao fato do inversor estar processando 100% da sua potência nominal no momento do ensaio. Quando a THDv é naturalmente baixa, conclui-se que praticamente não há cargas não lineares conectadas ao circuito, ou que a impedância neste ponto é baixa, ou, em outras palavras, que a potência de curto-circuito é elevada no ponto analisado.



**Figura 135:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 conectado na fase C, do Centro de Eventos da UFSC.

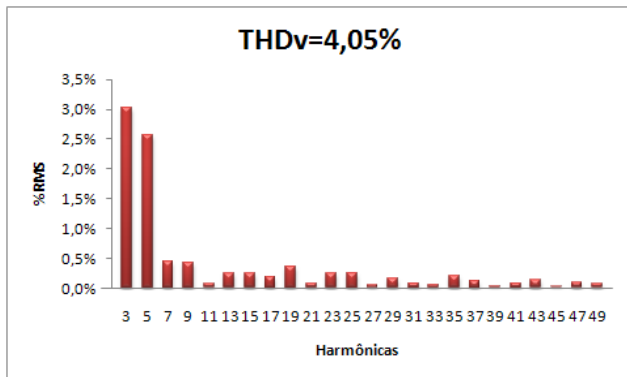
### 5.3.3 CELESC (sede) / UFSC / 1,4 kWp

O SFCR da CELESC (sede) / UFSC também opera satisfatoriamente desde a sua instalação em 2003. Na Figura 136 observa-se a tensão no ponto de conexão e a corrente entregue pelo inversor, processando cerca de 90% da sua potência nominal no instante do ensaio.



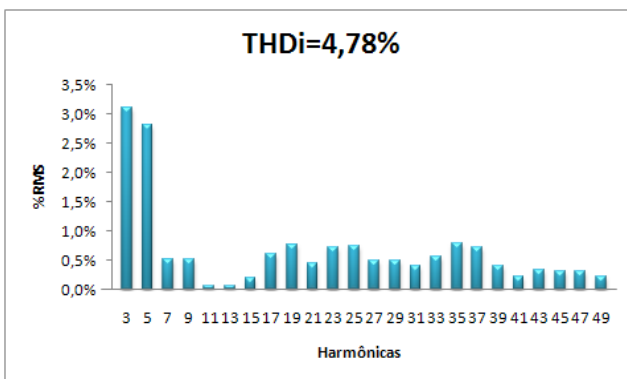
**Figura 136:** Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W da CELESC (sede) / UFSC com 90% de carregamento.

O conteúdo harmônico da tensão é ligeiramente melhor com a geração FV, conforme se observa na Figura 137, se comparado ao valor de THDv sem o gerador FV, mostrado na Figura 140.



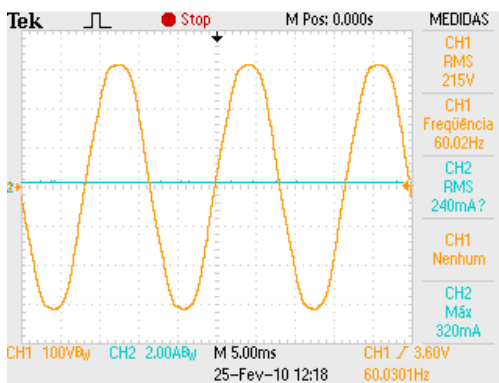
**Figura 137:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão da CELESC / UFSC com o inversor WÜRTH de 650 W operando.

A THDi, que aparece na Figura 138, está abaixo dos 5% exigidos por normas internacionais.

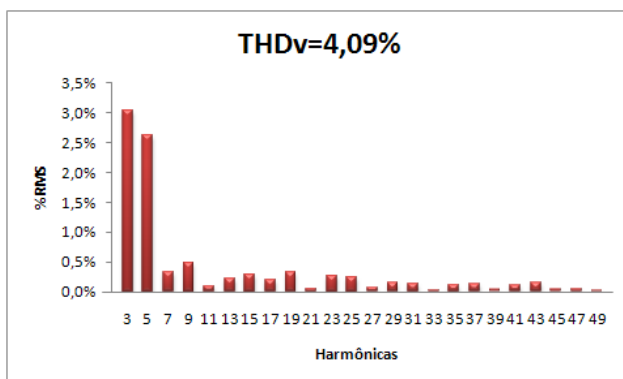


**Figura 138:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH de 650 W da CELESC / UFSC.

Já o nível de tensão, observado na Figura 139, está em 215 V sem a geração FV, e chega a 220 V com a geração FV.



**Figura 139:** Tensão no ponto de conexão na CELESC / UFSC, sem o gerador FV.

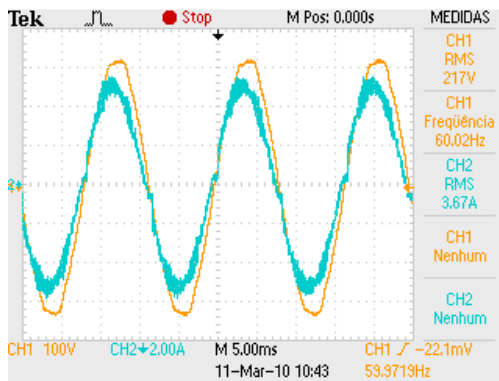


**Figura 140:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, na CELESC / UFSC.

### 5.3.4 Casa Eficiente / ELETROSUL / UFSC / 2,25 kWp

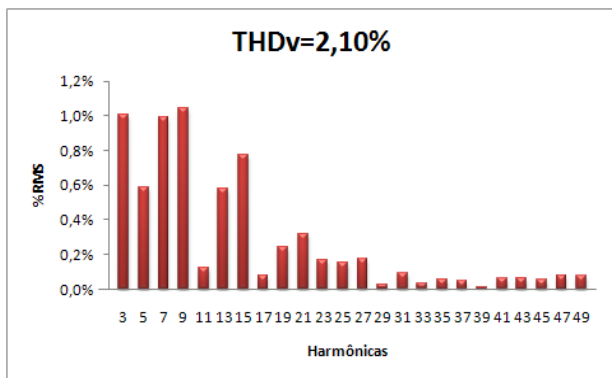
O SFCR da Casa Eficiente também utiliza inversores WÜRTH de 1.500 W, pertencentes a uma geração de inversores de cerca de dez anos atrás e, portanto, sem muitos dos recursos dos inversores atuais.

A Figura 141 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente fornecida pelo inversor, processando cerca de 60% da sua potência nominal.



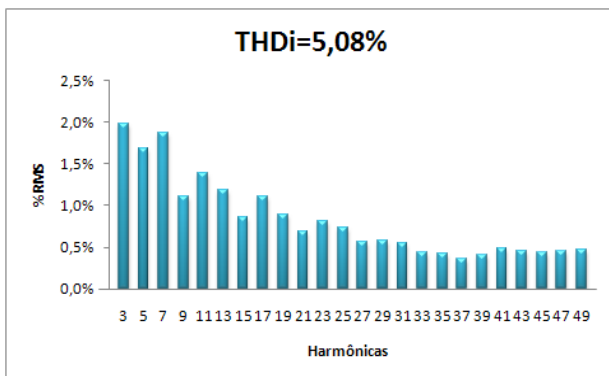
**Figura 141:** Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 1.500 W da Casa Eficiente com 60% de carregamento.

A THDv é ligeiramente mais baixa com o gerador FV operando, como pode ser observado comparando as Figuras 142 e 145.



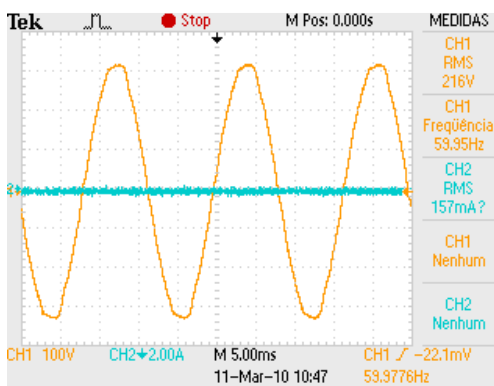
**Figura 142:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão da Casa Eficiente com o inversor WÜRTH de 1.500 W operando.

O conteúdo harmônico da corrente, observado na Figura 143, está ligeiramente acima dos 5% recomendados por norma, o que caracteriza a presença de cargas não lineares no circuito elétrico do ponto de conexão.

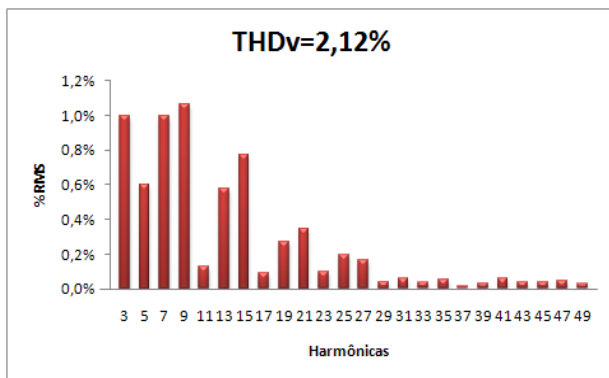


**Figura 143:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor WÜRTH de 1.500 W da Casa Eficiente.

O nível de tensão também se elevou ligeiramente com a presença do gerador FV, conforme se observa na Figura 144, se comparado com o valor da tensão apresentado na Figura 141.



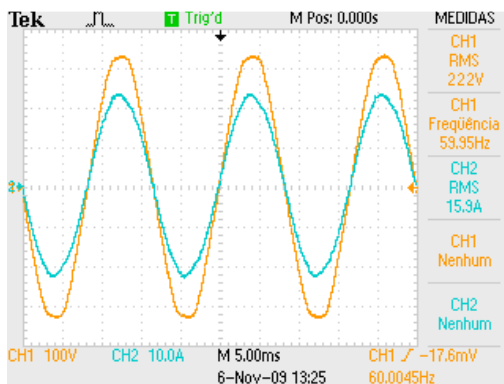
**Figura 144:** Tensão no ponto de conexão na Casa Eficiente, sem o gerador FV.



**Figura 145:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração FV, na Casa Eficiente.

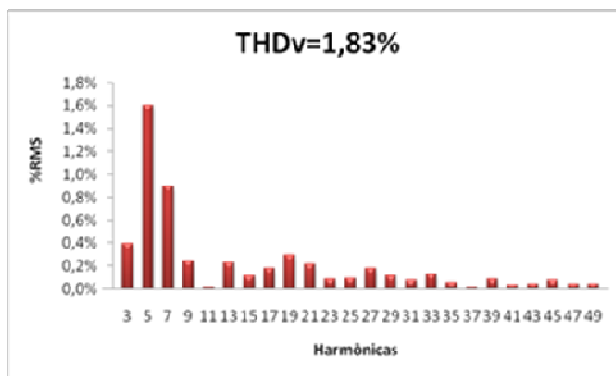
### 5.3.5 ELETROSUL (sede) / UFSC / 11,97 kWp

A Figura 146 mostra a forma de onda da tensão e da corrente no ponto de conexão de um dos inversores do SFCR da ELETROSUL / UFSC. A Figura 147 mostra o conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão e a Figura 148 o conteúdo harmônico da corrente fornecida por um dos inversores SB4000US.

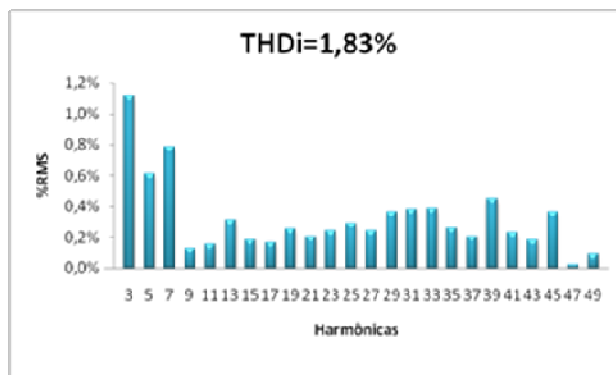


**Figura 146:** Tensão e corrente na saída de um dos inversores SB4000US do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, com 90% de carregamento.



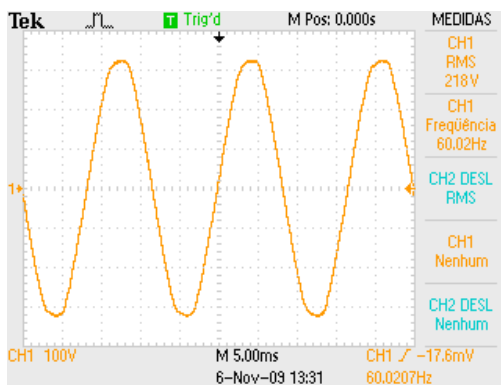


**Figura 147:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, com o inversor SB4000U operando.

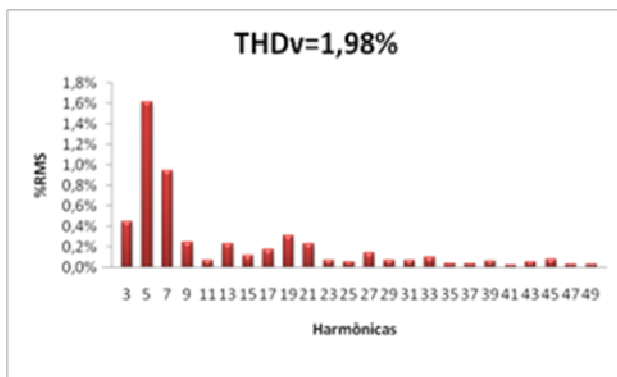


**Figura 148:** Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores SB4000U do SFCR de 11,97 kWp da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis.

Neste caso, com o inversor injetando corrente na rede e processando cerca de 90% da sua potência nominal no momento do ensaio, percebe-se o baixo conteúdo harmônico tanto da tensão quanto da corrente. Nas Figuras 149 e 150, agora sem a geração fotovoltaica (inversor desligado), observa-se a qualidade da energia no ponto de conexão, sem a influência do gerador fotovoltaico.



**Figura 149:** Tensão no ponto de conexão da ELETROSUL / UFSC em Florianópolis, sem o gerador FV.



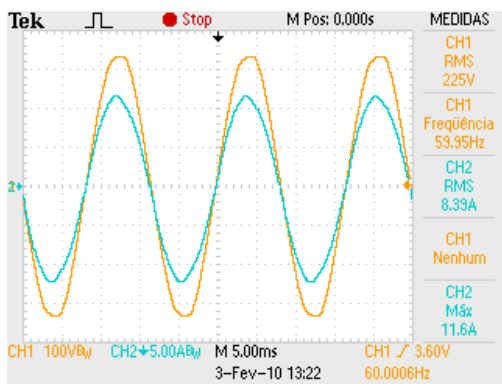
**Figura 150:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, na ELETROSUL / UFSC.

Comparando as Figuras 147 e 150, observa-se que a distorção harmônica total da tensão foi menor com o gerador fotovoltaico operando. Quanto à amplitude da tensão no ponto de conexão, observa-se uma melhora, passando dos 218 V (sem o gerador fotovoltaico) para 222 V (com o gerador fotovoltaico).

### 5.3.6 Colégio de Aplicação / TRACTEBEL / UFSC / 1,99 kWp

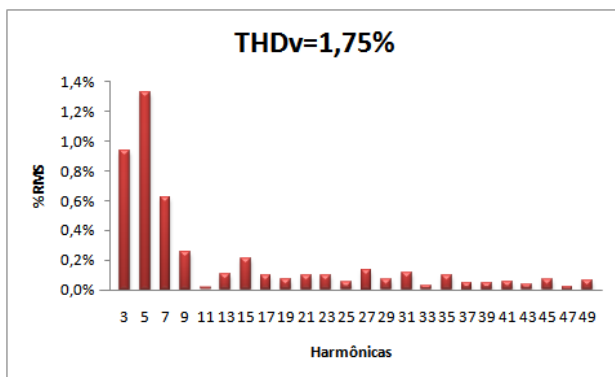
O SFCR do Colégio de Aplicação utiliza um inversor SB2500 e no momento do ensaio estava processando aproximadamente 65% da

sua potência nominal. A Figura 151 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente injetada na rede pelo inversor.



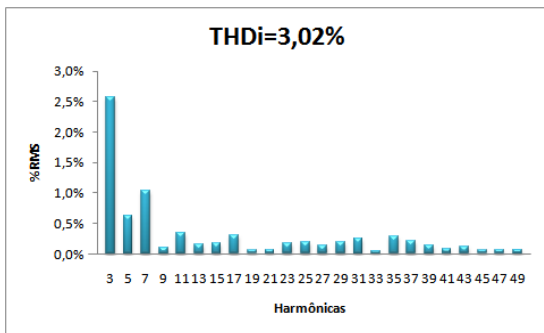
**Figura 151:** Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com 65% de carregamento.

O conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão é menor com o gerador FV presente (Figura 152), do que sem o gerador FV, (Figura 155).

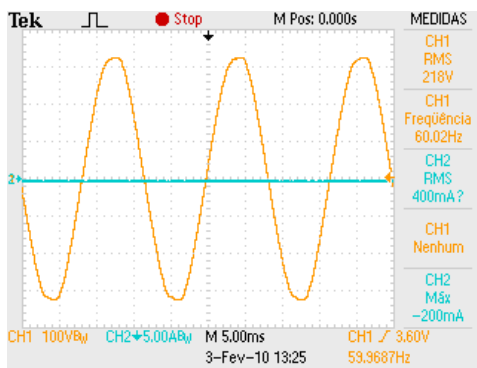


**Figura 152:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC, com o inversor SB2500 operando.

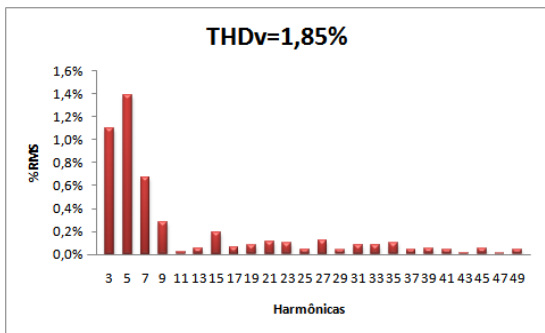
O conteúdo harmônico da corrente é baixo, como mostra a Figura 153. Quanto à amplitude da tensão no ponto de conexão, mostrada na Figura 154, é mais baixa sem o gerador FV.



**Figura 153:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Colégio de Aplicação da UFSC.



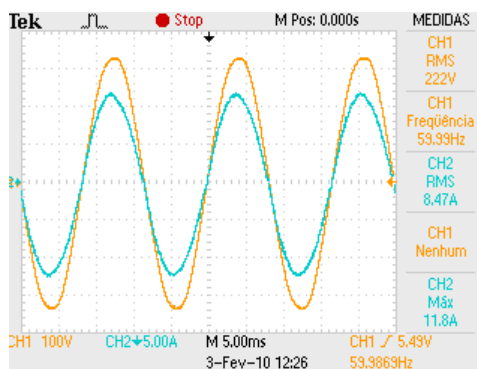
**Figura 154:** Tensão no ponto de conexão do Colégio de Aplicação da UFSC, sem o gerador FV.



**Figura 155:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Colégio de Aplicação da UFSC.

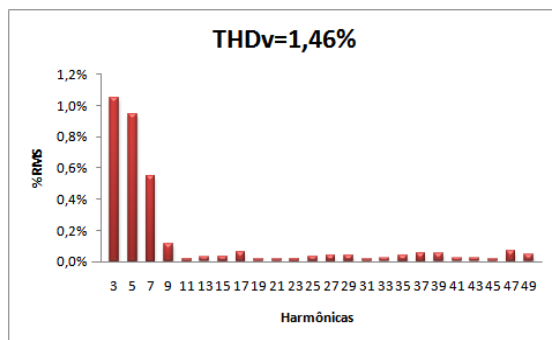
### 5.3.7 Hospital Universitário / TRACTEBEL / UFSC / 1,99 kWp

O SFCR do Hospital Universitário da UFSC é idêntico ao do Colégio de Aplicação, utiliza um inversor SB2500, que no momento do ensaio estava com uma potência processada de aproximadamente 70% da sua potência nominal. A Figura 156 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente fornecida à rede pelo inversor.



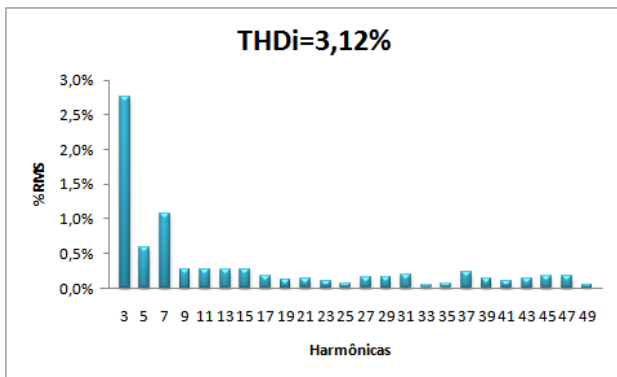
**Figura 156:** Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário com 70% de carregamento.

O conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão, mostrado na Figura 157, também diminuiu com a presença do gerador FV, se comparado com o conteúdo harmônico da tensão sem o gerador FV, mostrado na Figura 160.



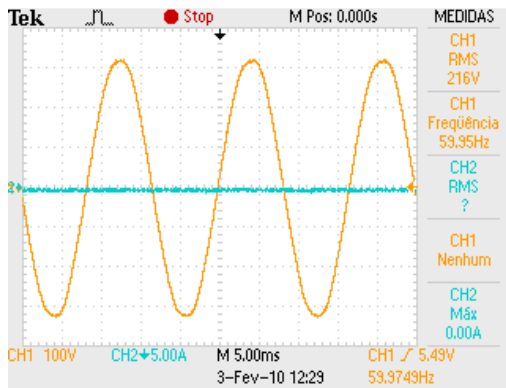
**Figura 157:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário, com o inversor SB2500 operando.

A corrente está com o valor de THDi dentro da normalidade e é apresentada na Figura 158.

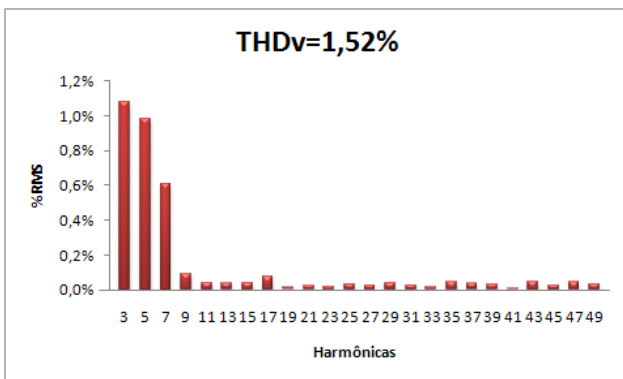


**Figura 158:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 1,99 kWp do Hospital Universitário.

A amplitude da tensão sem o gerador FV é mais baixa (216 V), e é mostrada na Figura 159.



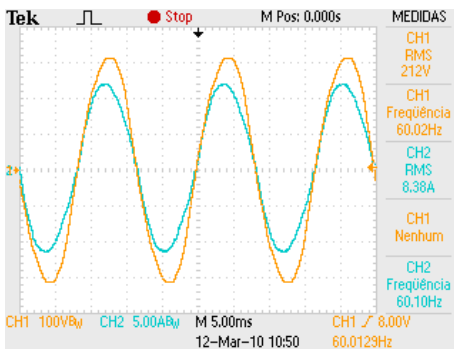
**Figura 159:** Tensão no ponto de conexão do Hospital Universitário da UFSC, sem o gerador FV.



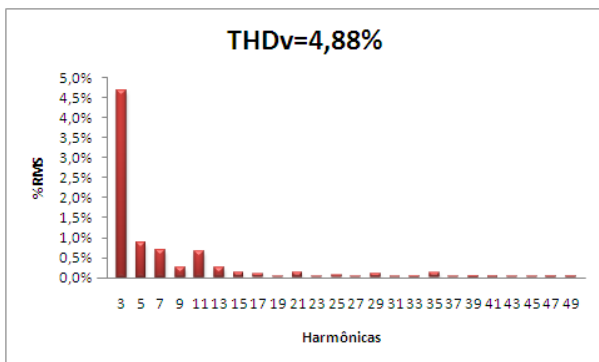
**Figura 160:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Hospital Universitário da UFSC.

### 5.3.8 Aeroporto Hercílio Luz / TRACTEBEL / UFSC / 2,12 kWp

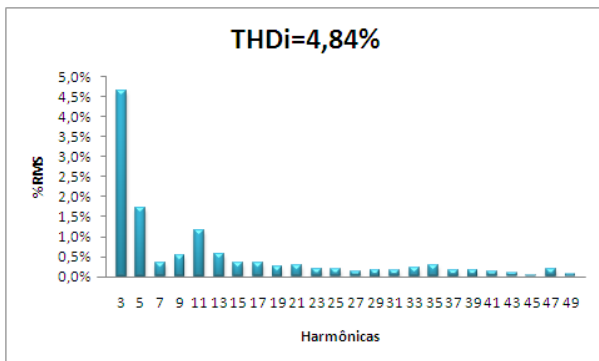
O SFCR do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis foi um dos que apresentou dificuldades de conexão. Neste caso, em dias quentes, equipamentos de ar condicionado, ligados na mesma rede elétrica do inversor, ao entrarem em operação, provocavam um transitório na rede, que por sua vez causava o desligamento também momentâneo do inversor, reduzindo a geração diária. Cada desligamento do inversor deixava o SFCR desconectado da rede elétrica, ou seja, sem gerar energia por cerca de dois minutos, e nos momentos de grande incidência solar, esse fato provocava uma redução significativa no desempenho do SFCR citado. A Figura 161 mostra a forma de onda da tensão e da corrente no ponto de conexão, e as Figuras 162 e 163 os conteúdos harmônicos da tensão e da corrente, com o inversor processando 65% da sua potência nominal.



**Figura 161:** Tensão e corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, com 65% de carregamento.



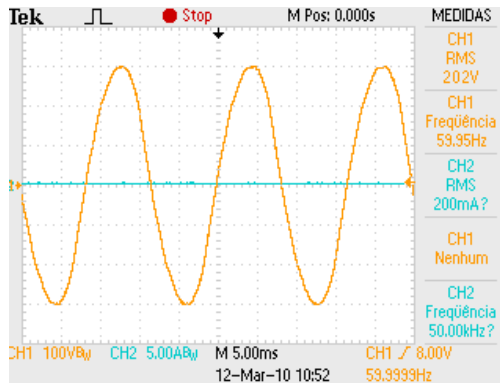
**Figura 162:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão no SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, com o inversor SB2500 operando.



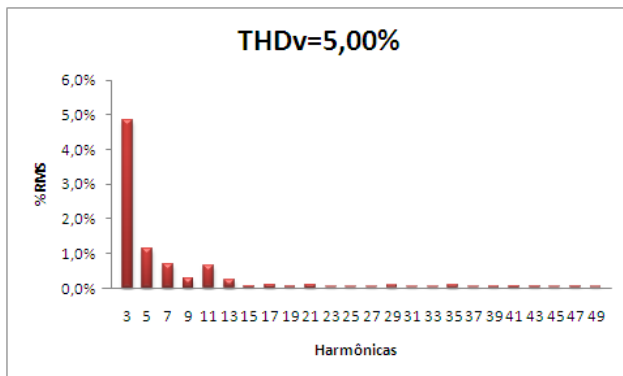
**Figura 163:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SB2500 do SFCR de 2,12 kWp do Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis.



Nas Figuras 164 e 165, é possível observar dois parâmetros importantes quando não há influência da geração fotovoltaica; a tensão no ponto de conexão está baixa (202 V), e a THDv é elevada (5,00%). Novamente, percebe-se ao voltar às Figuras 161 e 162 que esses valores melhoram quando a geração fotovoltaica está presente; a tensão no ponto de conexão sobe para 212 V, e a THDv cai para 4,88%.



**Figura 164:** Tensão no ponto de conexão no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis, sem o gerador FV.



**Figura 165:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Aeroporto Hercílio Luz em Florianópolis.

Neste caso, a solução para evitar desligamentos do inversor foi obtida alterando os parâmetros do próprio equipamento, sem a necessidade de alterar o ponto de conexão do sistema fotovoltaico. Os parâmetros alterados foram “dZac-Max” e “Uac-Min”.

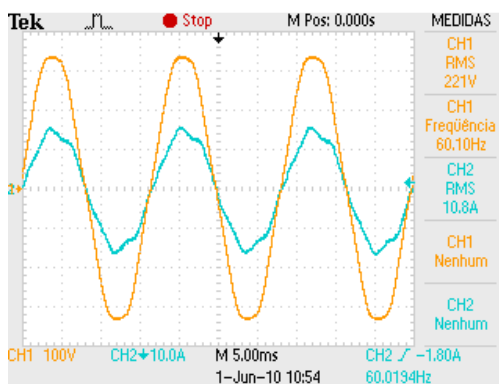
O parâmetro “dZac-Max” representa o limite de variação da impedância no lado CA. Este valor foi elevado em relação ao original, ou seja, variações bruscas de cargas conectadas no mesmo circuito onde está o inversor, passam a ser mais toleradas.

O parâmetro “Uac-Min” representa a mínima tensão CA que deve estar presente no ponto de conexão para manter o inversor operando. Como o inversor está conectado a um ponto do circuito elétrico no aeroporto onde naturalmente a tensão já é baixa, a entrada em operação de novas cargas, como equipamentos de ar condicionado, provoca subtensões momentâneas que também podem provocar o desligamento do inversor. Após alguns instantes, a rede se normaliza e o inversor volta a se conectar e injetar energia na rede. Porém, esses tempos de parada reduzem a produtividade do SFCR.

Cabe ressaltar que os inversores possuem valores pré-ajustados nos seus parâmetros para uma rede elétrica de boa qualidade, o que é realidade em países como a Alemanha. Porém, à medida que torna-se necessário ajustar estes parâmetros para adaptar à realidade brasileira, abre-se mão de parte dos requisitos de segurança na operação dos inversores, principalmente no quesito anti-ilhamento.

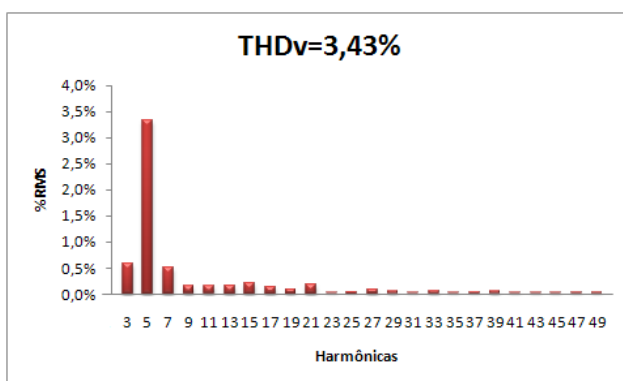
### 5.3.9 Condomínio Pedra Branca / UFSC / 6,4 kWp;

O SFCR do condomínio Pedra Branca também opera normalmente. No entanto, os ensaios foram realizados em um dia de baixa incidência de radiação solar. O inversor estava processando cerca de 30% da sua potência nominal, e este fato leva a uma degradação da qualidade da corrente fornecida pelo inversor. A Figura 166 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente, bastante deformada, entregue à rede elétrica.

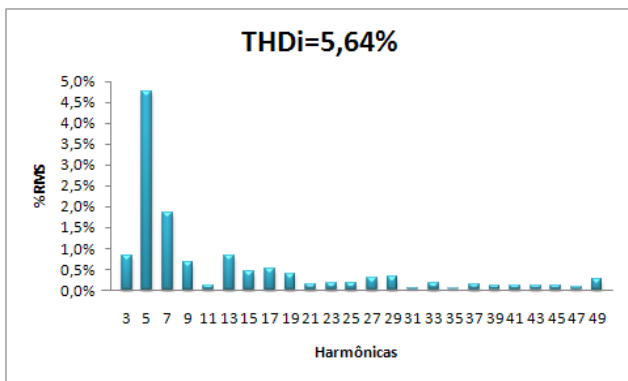


**Figura 166:** Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca com 30% de carregamento.

Ao observar o conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão (Figura 167) e o da corrente (Figura 168), verifica-se que ambos estão elevados, inclusive o THDv com o gerador FV operando é superior ao observado na Figura 170.

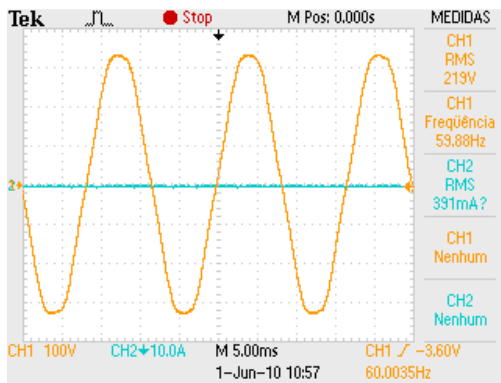


**Figura 167:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca, com o inversor SMC6000A operando.

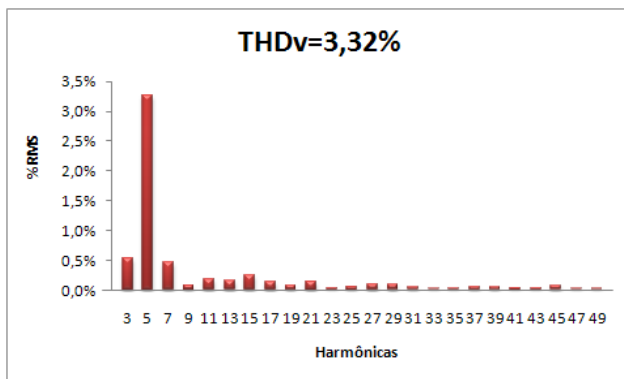


**Figura 168:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca.

Na ausência do gerador FV, a tensão é um pouco inferior e o conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão já é naturalmente um pouco acima dos valores normalmente encontrados, conforme se pode observar nas Figuras 169 e 170.



**Figura 169:** Tensão no ponto de conexão do Condomínio Pedra Branca, sem o gerador FV.

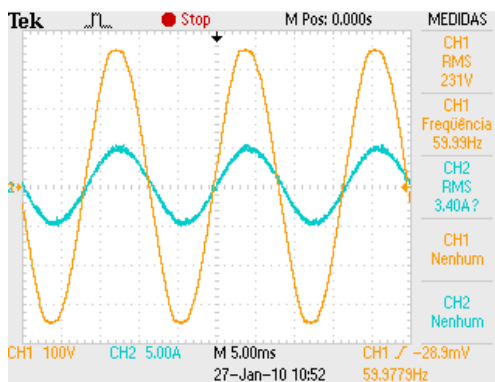


**Figura 170:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, no Condomínio Pedra Branca

## 5.4 ENSAIOS NOS INVERSORES DO GRUPO ZEPPINI - ESTUDO DE CASO

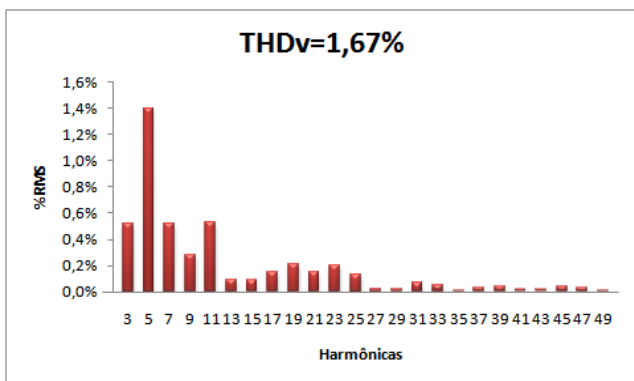
### 5.4.1 Motor Z / Grupo Zeppini / 2,45 kWp

O SFCR da Motor Z, pertencente ao Grupo Zeppini, opera perfeitamente. A rede elétrica da Motor Z foi utilizada também para a conexão do SFCR da Fundação Estrela, descrita no item 5.4.2. A Figura 171 mostra a tensão no ponto de conexão e a corrente injetada na rede pelo inversor operando com cerca de 70% da sua potência nominal.



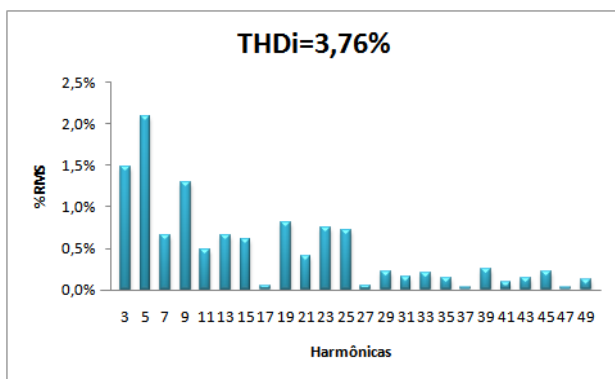
**Figura 171:** Tensão e corrente na saída de um dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, com 70% de carregamento.

O conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão, visto na Figura 172, diferentemente do que normalmente acontece, elevou-se com a presença do gerador FV. Isto é atribuído ao fato de a THDv no ponto de conexão já ser naturalmente baixo, 1,21%, conforme pode ser visto na Figura 175.



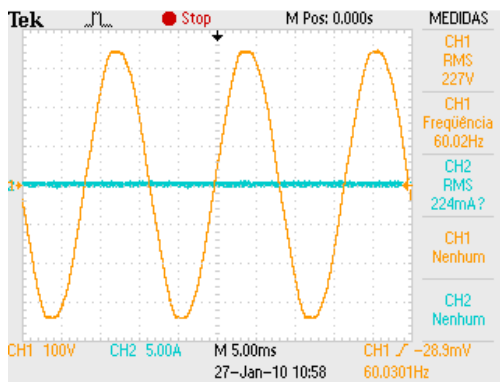
**Figura 172:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, com o inversor SB1100 operando.

Quanto ao conteúdo harmônico da corrente entregue pelo inversor, observado na Figura 173, este encontra-se dentro dos valores recomendados por norma.

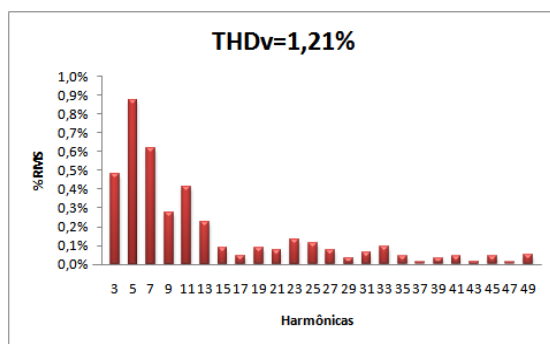


**Figura 173:** Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores SB1100 do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z.

Ao comparar a amplitude da tensão com e sem o gerador FV, (Figura 171 e Figura 174 respectivamente), novamente percebe-se a elevação da tensão quando o gerador FV está operando.



**Figura 174:** Tensão no ponto de conexão do SFCR de 2,45 kWp da Motor Z, sem o gerador FV.



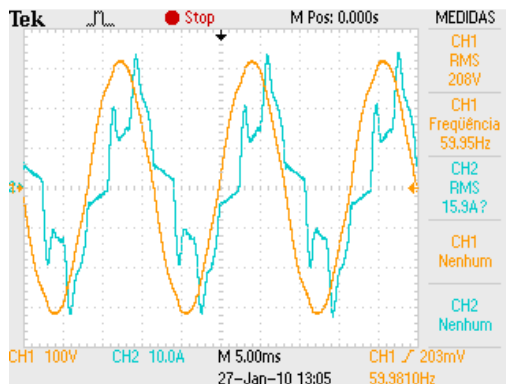
**Figura 175:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, na Motor Z.

#### 5.4.2 Fundação Estrela / Grupo Zeppini / 14,69 kWp

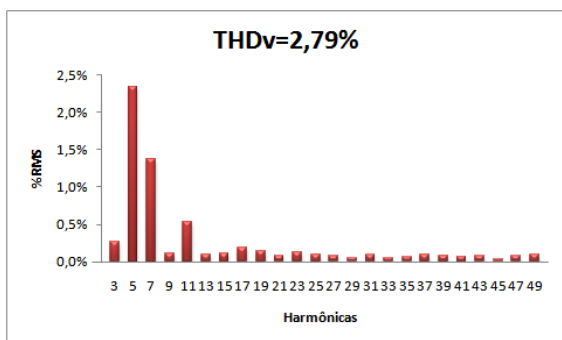
No SFCR da Fundação Estrela houve dificuldade em manter a conexão entre o inversor e a rede elétrica. Na entrada em operação do sistema, em junho de 2008, foi necessário realizar a conexão em um quadro elétrico pertencente à Motor Z, empresa vizinha pertencente ao mesmo grupo empresarial. Os três inversores do SFCR (dois

SMC6000A e um SB2500, ambos da SMA) rejeitavam a rede elétrica acusando falha de CA. Posteriormente, ensaios foram realizados no quadro elétrico inicialmente escolhido para a conexão (quadro elétrico 1), com o intuito de avaliar a qualidade da energia no ponto de conexão.

A Figura 176 mostra a forma de onda da tensão de linha<sup>11</sup> e da corrente de uma fase para o quadro citado, a Figura 177 mostra o conteúdo harmônico da tensão de linha e a Figura 178 o conteúdo harmônico da corrente da fase A do quadro 1.



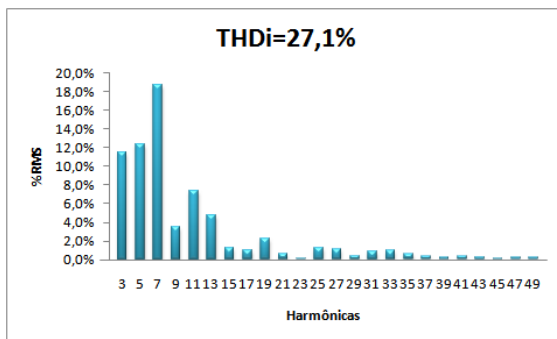
**Figura 176:** Tensão  $V_{AB}$  e corrente  $I_A$  medidos no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela.



**Figura 177:** Componentes harmônicos da tensão  $V_{AB}$  no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela.

<sup>11</sup> Tensão entre duas fases, neste caso, 220V.





**Figura 178:** Componentes harmônicos da corrente  $I_A$  no quadro elétrico 1 da Fundação Estrela.

As tensões de linha  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  apresentaram THDv de 2,79%, 2,11% e 2,12%, respectivamente, e as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ , THDi de 27,1%, 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. Nesse caso, a simples análise da THDv 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: (i) buscar outro ponto de conexão (outro quadro elétrico) e medir com o osciloscópio as formas de onda de tensão e corrente nas três fases e também seus conteúdos harmônicos; (ii) manter o ponto de conexão inicialmente escolhido e alterar parâmetros operacionais do inversor. Uma terceira opção poderia ter sido adotada, porém, exigiria investimentos adicionais, como melhorar a rede elétrica interna da empresa, substituindo os condutores por outros de maior seção e alterando levemente os parâmetros dos inversores.

Um segundo quadro elétrico foi escolhido e as tensões de linha  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  apresentaram THDv de 2,05%, 2,20% e 4,11%, respectivamente, e as correntes  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ , THDi de 3,39%, 12,30% e 3,55%. A qualidade da 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, adotou-se também a segunda opção, alterar parâmetros de operação do inversor. Os parâmetros alterados foram “dZac-Max”, “I-NiTest”, “Uac-Min”, “Uac-Max”, “Fac-delta-” e “Fac-delta+”.

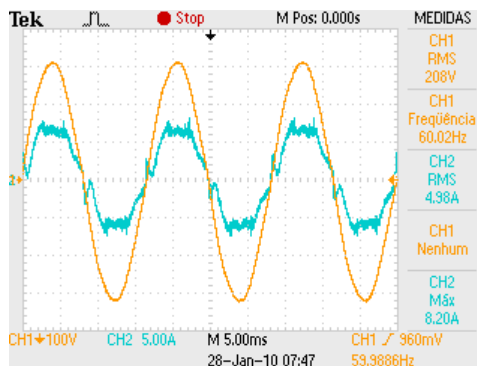
O parâmetro “dZac-Max” representa o limite de variação da impedância no lado CA. Este valor foi elevado em relação original; ou seja, variações bruscas de cargas conectadas no mesmo circuito onde está o inversor, passam a ser mais toleradas.

O parâmetro “I-NiTest” atribui o valor de pico dos pulsos de corrente injetados na rede elétrica a cada um segundo, que se sobrepõem à corrente entregue pelo inversor. Esses pulsos permitem a medição da impedância da rede elétrica pelo inversor. Portanto, o ajuste desse parâmetro está relacionado ao ajuste do parâmetro “dZac-Max”. O valor atribuído ao parâmetro “I-NiTest” foi reduzido em relação ao original, para o inversor aceitar uma condição mais desfavorável da rede elétrica.

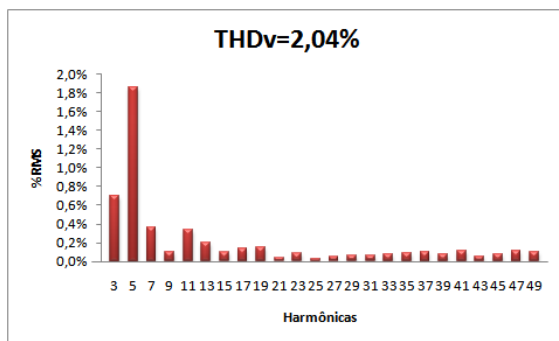
Os parâmetros “Uac-Min” e “Uac-Max” representam a mínima e a máxima tensão CA que devem estar presentes no ponto de conexão para manter o inversor operando.

Os parâmetros “Fac-delta-” e “Fac-delta+” representam os desvios em *hertz*, para menos e para mais, em relação à frequência da rede (60 Hz) em que o inversor ainda continua operando. Os parâmetros relativos à frequência foram alterados para permitir a conexão quando entra em operação um gerador a 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.

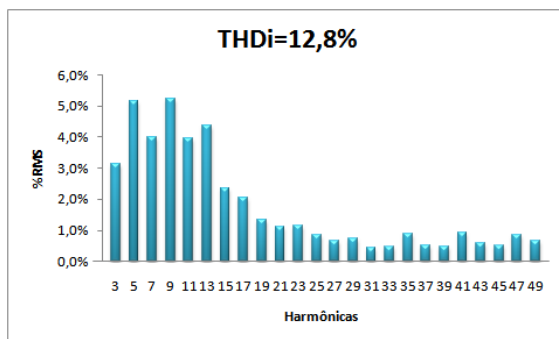
Após uma sequência de ajustes nos parâmetros, alternados com tentativas de conexão pelo inversor e conexões que não se sustentavam, os três inversores entraram em operação. As Figuras 179 a 181 mostram as aquisições e gráficos de THD para um inversor SMA modelo SMC6000A operando com aproximadamente 15% da potência nominal, no primeiro quadro elétrico citado e já com seus parâmetros alterados. A Tabela 6 mostra os parâmetros do inversor, com seus valores originais e com os valores que permitiram a conexão ao quadro elétrico 1 da Fundação Estrela. A solução testada no quadro elétrico 1, apenas alterando parâmetros do inversor, é uma alternativa à solução de engenharia mais comumente realizada nessas situações, que seria a implementação de filtros ativos ou passivos no circuito elétrico que apresenta tal deformação na corrente elétrica.



**Figura 179:** Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp com carregamento de 15%, e conectado ao quadro 1 da Fundação Estrela após a alteração de seus parâmetros.



**Figura 180:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão (quadro 1) na Fundação Estrela, com o gerador FV de 14,69 kWp.

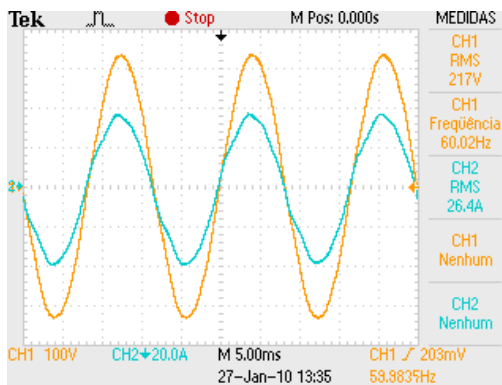


**Figura 181:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp (conectado ao quadro 1) da Fundação Estrela.

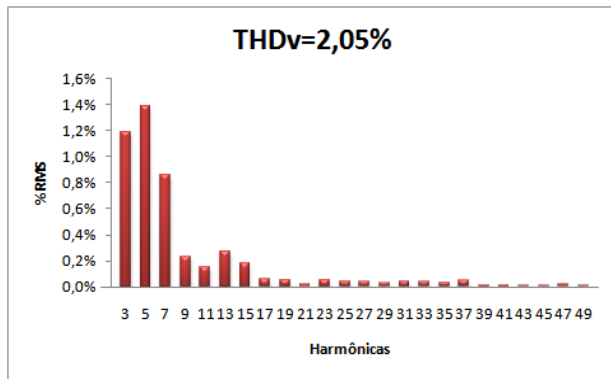
**Tabela 6:** Valores atribuídos aos parâmetros de operação dos inversores SMA da Fundição Estrela (no quadro elétrico 1).

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor inicial</i>	<i>Valores admitidos</i>	<i>Valor ajustado</i>
dZac-Max	350 mΩ	0 – 20.000 mΩ	20.000 mΩ
I-NiTest	8 A	0 – 20 A	4 A
Uac-Min	210 V	180 – 300 V	200 V
Uac-Max	250 V	180 – 300 V	262 V
Fac-delta-	2,45 Hz	0 – 4,5 Hz	4 Hz
Fac-delta+	0,19 Hz	0 – 4,5 Hz	4 Hz

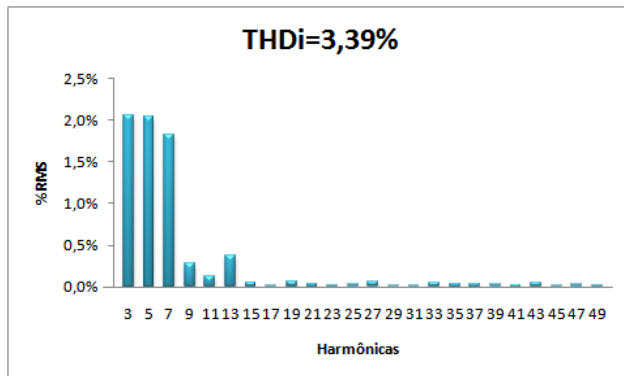
Para garantir que a máxima geração fotovoltaica não fosse prejudicada por desligamentos aleatórios, o ponto de conexão foi alterado para o segundo quadro com melhor qualidade de energia (quadro elétrico 2), e os parâmetros dos inversores foram ajustados para essa nova condição. A Figura 182 mostra a forma de onda da tensão de linha e da corrente de uma fase para o quadro 2, e as Figuras 183 e 184 os respectivos conteúdos harmônicos antes da conexão dos inversores.



**Figura 182:** Tensão  $V_{AB}$  e corrente  $I_A$  medidos no quadro elétrico 2 da Fundição Estrela.

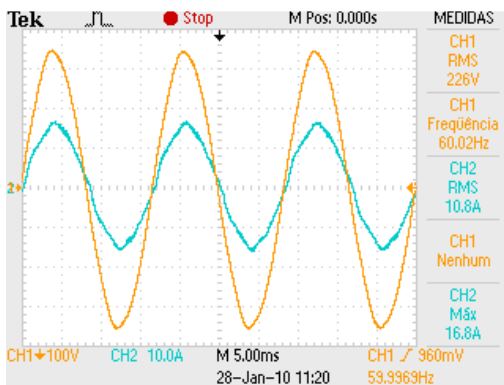


**Figura 183:** Componentes harmônicos da tensão  $V_{AB}$  no quadro elétrico 2 da Fundação Estrela.

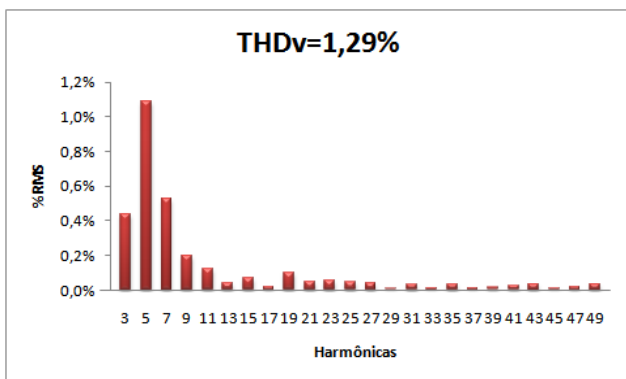


**Figura 184:** Componentes harmônicos da corrente  $I_A$  no quadro elétrico 2 da Fundação Estrela.

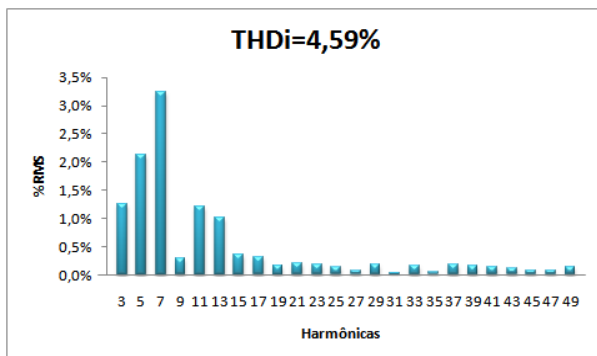
As Figuras 185 a 187 mostram as aquisições e gráficos de THD para um dos inversores SMA modelo SMC6000A operando com aproximadamente 35% da potência nominal, no segundo quadro elétrico, com seus parâmetros ajustados a essa nova condição.



**Figura 185:** Tensão e corrente na saída do inversor SMC6000A do SFCR de 14,69 kWp com carregamento de 35%, conectado ao quadro 2 da Fundação Estrela.



**Figura 186:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão (quadro 2) na Fundação Estrela, com o gerador FV de 14,69 kWp.



**Figura 187:** Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor SMC6000A (conectado ao quadro 2) do SFCR de 14,69 kWp da Fundação Estrela.

A conexão dos três inversores ao quadro elétrico 2, com melhor qualidade de energia, permitiu ajustar os parâmetros dos inversores aos valores recomendados pelo fabricante (com exceção dos parâmetros “Fac-delta-” e “Fac-delta+”), para permitir a conexão também quando o gerador diesel de 550 kVA opera, seja por falta ou desligamento programado da rede diariamente durante o horário de ponta. Devido ao horário de verão, ainda há coincidência no início do horário de ponta com a incidência solar em alguns meses do ano. Portanto, é importante garantir a conexão também com o gerador diesel da indústria, que entra em operação automaticamente todos os dias úteis durante o horário de ponta. A adequação do parâmetro de frequência permitiu aumentar a produtividade dos SFCRs da Fundação Estrela (conectado ao quadro elétrico 2) e da Motor Z. A Tabela 7 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros dos inversores SMA que permitiram aos sistemas FV operarem com maior produtividade.

**Tabela 7:** Valores atribuídos aos parâmetros de operação dos inversores SMA da Fundação Estrela (no quadro elétrico 2) e da Motor Z.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor padrão</i>	<i>Valores admitidos</i>	<i>Valor ajustado</i>
dZac-Max	350 mΩ	0 – 20.000 mΩ	750 mΩ
I-NiTest	8 A	0 – 20 A	6 A
Uac-Min	198 V	180 – 300 V	200 V
Uac-Max	260 V	180 – 300 V	262 V
Fac-delta-	2,45 Hz	0 – 4,5 Hz	4 Hz
Fac-delta+	0,19 Hz	0 – 4,5 Hz	4 Hz

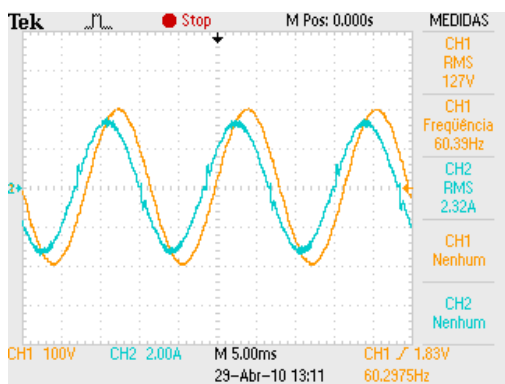
## 5.5 ENSAIOS NOS INVERSORES DO SISTEMA HÍBRIDO FV-DIESEL

### 5.5.1 Araras (Nova Mamoré – RO) / Híbrido FV-diesel / 20,48 kWp

Dos ensaios realizados nos inversores do sistema híbrido FV-diesel instalado em Araras, são apresentadas as aquisições realizadas em um dos trinta e dois inversores.

Esse sistema híbrido FV-diesel é responsável pelo abastecimento da Vila de Araras em Rondônia, e a participação da energia fotogerada acarreta em diminuição no consumo do diesel. Na seção 2.2.2 foram apresentados mais detalhes sobre esta instalação.

A Figura 188 mostra a forma de onda da tensão em uma das fases obtida no quadro elétrico que centraliza as conexões com os trinta e dois inversores com a rede gerada a partir do gerador diesel e a corrente injetada por um dos inversores processando 45% da sua potência nominal.



**Figura 188:** Tensão e corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W do gerador FV de 20,48 kWp em Araras, com carregamento de 45%.

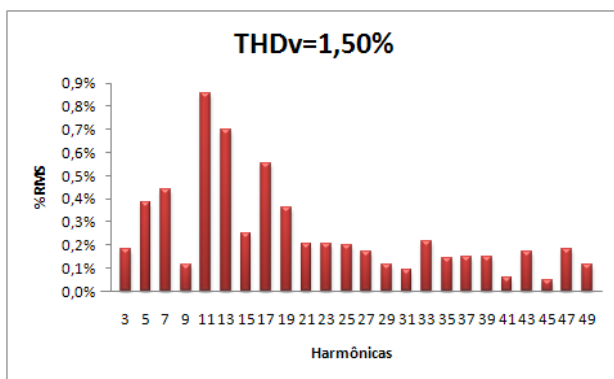
A defasagem observada entre a tensão e a corrente é devido à medição da tensão ter sido realizada em um ponto distante do ponto de conexão do inversor, na mesma fase, mas a alguns metros do ponto de conexão. Fato que acrescentou uma impedância entre o ponto de conexão e o ponto de medição. Junto aos terminais do inversor, tensão e corrente estão em fase.

Devido à impossibilidade de repetir essa medição em campo, essa aquisição foi mantida, porém, foi realizado ensaio em laboratório,

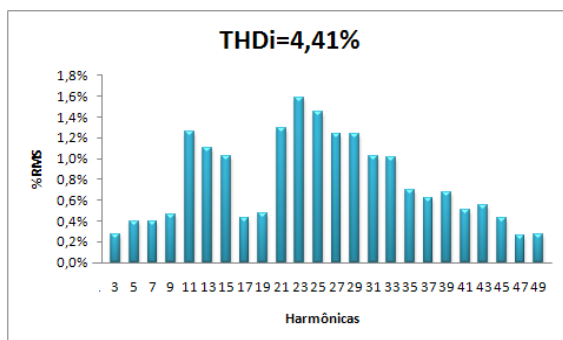


inserindo uma indutância entre o inversor e o ponto de medição da tensão e a defasagem também foi reproduzida.

O conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão (Figura 189) aumentou com o gerador FV, e o conteúdo harmônico da corrente injetada na rede pelo inversor é elevado, mas dentro dos limites estabelecidos em norma, como mostra a Figura 190.

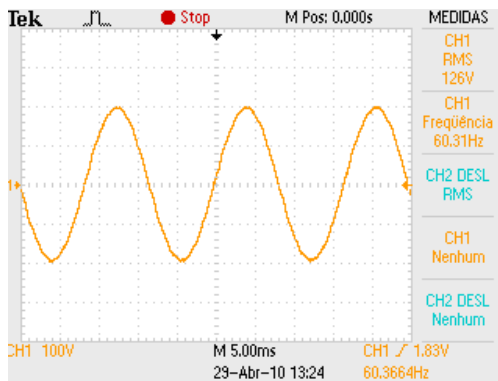


**Figura 189:** Componentes harmônicos da tensão no ponto de conexão em Araras, com o gerador FV de 20,48 kWp.

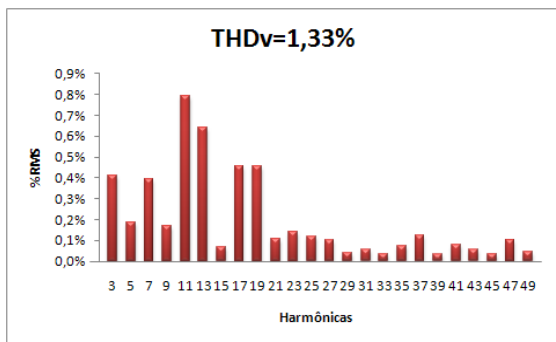


**Figura 190:** Componentes harmônicos da corrente na saída de um dos inversores WÜRTH de 650 W pertencente ao gerador FV de 20,48 kWp em Araras.

Com o gerador FV desligado, observa-se nas Figuras 191 e 192 uma senóide de ótima qualidade, e com baixo conteúdo harmônico.



**Figura 191:** Tensão no ponto de conexão em Araras - RO, sem o gerador FV.



**Figura 192:** Componentes harmônicas da tensão no ponto de conexão, sem a geração fotovoltaica, em Araras - RO.

Os ensaios realizados e apresentados neste capítulo permitiram observar as características da qualidade da energia no ponto de conexão, com os geradores FV operando e desligados. Os ensaios foram realizados em campo (condições reais de operação) e em laboratório (sob condições controladas), o que permitiu confrontar os resultados obtidos, visando aprimorar as conclusões sobre o tema.

As várias condições de operação a que foram submetidos os inversores dos SFCRs serviram para explorar os limiares que ainda permitem a conexão, seja através de uma simples parametrização ou até mesmo atuando na própria instalação elétrica onde se deseja realizar a conexão do gerador FV. O capítulo de conclusões, a seguir, irá abordar esses assuntos em maior detalhe.

## **6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A partir da metodologia apresentada, foi possível atingir os objetivos específicos e o objetivo geral deste trabalho, bem como comprovar a hipótese proposta.

Através do levantamento dos parâmetros de qualidade de energia obtidos nos ensaios realizados nos SFCRs, em campo e em laboratório, foi possível identificar e quantificar a interação entre esses parâmetros e o funcionamento de inversores utilizados em SFCR.

Ensaio realizado em laboratório com o uso da fonte de CA, nos quais, além da amplitude e da frequência, o conteúdo harmônico da tensão disponibilizada no ponto de conexão era controlado, permitiram quantificar os parâmetros elétricos que impedem a operação dos inversores de SFCR. O que leva o inversor a não entrar em operação são principalmente situações em que a rede elétrica apresenta alta impedância, onde normalmente é observado alto conteúdo harmônico da tensão.

Quanto à amplitude e à frequência da tensão no ponto de conexão, os inversores possuem faixas de valores pré-definidos que devem ser respeitadas para permitir a conexão, e nos inversores modernos, esses valores podem ser redefinidos através de uma simples parametrização. Ao aumentar essas faixas de valores, o inversor admite um intervalo maior de instabilidade da rede elétrica e pode não considerar como falha uma situação anormal da rede. Porém, as tolerâncias máximas do inversor podem ultrapassar valores admitidos pelas concessionárias e normas vigentes. Logo, devem prevalecer as orientações locais quanto à tolerância em relação à qualidade da energia elétrica.

Em relação ao conteúdo harmônico da tensão no ponto de conexão, deve-se olhar para esse parâmetro de uma forma mais ampla, buscando compreender a causa de um elevado THDv. No laboratório, o THDv era imposto ao ponto de conexão, com uma certa independência de outros fatores. Isso facilitou isolar o fenômeno da distorção na onda de tensão, que em campo é muito dependente das cargas elétricas conectadas ao mesmo circuito, e também da impedância da rede, ou, em outras palavras, da potência de curto-circuito.

Para permitir a conexão nos ensaios em laboratório, a premissa é de que seja desabilitada a medição de impedância da rede. A partir daí, o limiar do valor de THDv que ainda permite a conexão é verificado. Para essa condição, observou-se que para THDv de aproximadamente 10%, a

conexão ainda é viável, e que após a entrada em operação do inversor do SFCR, esse valor sofre uma leve redução, melhorando o formato da onda de tensão, desde de que o carregamento do inversor não seja muito baixo.

Os ensaios de campo realizados nos SFCRs instalados na UFSC, CELESC, ELETROSUL, TRACTEBEL, Pedra Branca, Zeppini e Araras, representam uma parcela significativa dos SFCRs existentes no Brasil. Portanto, os resultados dos ensaios realizados também o são.

Com estes ensaios, ficou evidente a elevação da tensão no ponto de conexão, fato que pode ser visto como positivo em situações onde a tensão naturalmente já se apresenta abaixo do valor nominal. Porém, a literatura aponta que devem ser tomados cuidados quanto à elevação da tensão, para elevados níveis de penetração dos SFCR.

Quanto ao conteúdo harmônico da tensão, visto que os inversores ensaiados são do tipo autocomutados e impõem sua forma de onda ao ponto de conexão, o THDv teve leve redução. Essa tendência se manifestou nos casos em que o inversor estava com carregamento entre moderado e pleno. Situações que levaram a um leve aumento no THDv são atribuídas ao fato de o conteúdo harmônico da tensão já ser muito baixo (*e.g.* THDv = 1,5% ou menos) e existirem cargas não lineares alimentadas pelo mesmo circuito ao qual está conectado o inversor. Nessa condição, o inversor entrega uma corrente também com elevado conteúdo harmônico, inclusive em alguns casos com THDi superior aos 5% previstos em norma.

Ainda como parte dos ensaios em campo, dois dos SFCRs analisados apresentaram dificuldade na conexão: o do Aeroporto Hercílio Luz, em Florianópolis – SC, e o da Fundação Estrela, pertencente ao grupo Zeppini, em São Bernardo do Campo - SP. Esses sistemas foram analisados com mais cuidado, visando identificar e interpretar os fenômenos que causaram a dificuldade na conexão e também adotar ações que viabilizassem a conexão do gerador FV. Comparando as duas situações, percebeu-se que as causas eram diferentes para a falha na conexão.

O método adotado nessa tese de verificar a qualidade da energia no ponto de conexão, de forma amostral, com o uso de um osciloscópio, mostrou-se adequado.

No Aeroporto, o ensaio apontou duas situações críticas e que estão relacionadas: a baixa amplitude e o elevado conteúdo harmônico da tensão. Neste caso, porém, a desconexão era esporádica e vinculada a dias muito quentes, quando equipamentos responsáveis pelo resfriamento de uma câmara fria entravam em operação. Normalmente,

em uma situação desse tipo, onde um equipamento eletrônico conectado ao circuito apresenta funcionamento irregular devido à baixa qualidade da rede elétrica, as soluções seriam investir em filtros ou reforçar a rede elétrica adotando condutores de maior seção. Porém, a solução adotada baseou-se simplesmente no ajuste de parâmetros do próprio inversor, não necessitando a mudança do ponto de conexão, ou de investimentos adicionais.

Já na Fundação Estrela, o SFCR de 14,69 kWp não entrou em operação quando conectado ao ponto inicialmente adotado. Os três inversores rejeitaram a rede elétrica acusando falha no lado CA. Após a análise no ponto de conexão pelo método proposto, obteve-se um diagnóstico da qualidade da energia e percebeu-se que, apesar do baixo THD<sub>v</sub>, o conteúdo harmônico da corrente era elevado, devido à presença de muitas cargas não lineares no ambiente da Fundação.

A situação de THD<sub>v</sub> baixo e THD<sub>i</sub> elevado é possível quando a potência de curto-circuito no ponto analisado é elevada. O valor de THD<sub>i</sub> medido nas três fases situou-se entre 30 e 50%. Para manter a conexão nesse ponto da instalação, além da alteração de alguns parâmetros do inversor, o THD<sub>i</sub> deveria ser reduzido com auxílio de filtros passivos ou ativos, seja no ponto de conexão do inversor do sistema FV ou ainda, diretamente junto às cargas que estão drenando corrente com elevado conteúdo harmônico. Outra solução seria instalar um circuito exclusivo a partir do transformador da indústria. Assim, o THD<sub>i</sub> dos demais circuitos teria menor efeito sobre o ponto de conexão com os inversores.

A medida efetivamente realizada foi a de identificar outro ponto de conexão com baixo conteúdo harmônico, tanto da tensão quanto da corrente. Porém, para explorar as possibilidades de conexão apenas alterando parâmetros dos inversores, foi também estabelecida a conexão do gerador FV ainda no ponto com elevada THD<sub>i</sub>. O parâmetro determinante para permitir a conexão em uma situação tão desfavorável, foi o “dZac-Máx”, que aumenta a tolerância quanto a variações de impedância da rede. Essa conexão, no entanto, não era estável, esporadicamente ocorriam desligamentos dos inversores, fato que levaria a uma menor produtividade do SFCR.

No âmbito dessa tese, foi ainda analisada a capacidade de conexão dos inversores em redes elétricas formadas a partir de geradores a diesel de médio e grande porte, e também um gerador a gasolina de pequeno porte. Quanto à conexão junto aos geradores a diesel, já era de conhecimento público a viabilidade desse tipo de instalação, visto que o LABSOLAR (UFSC) já havia colocado em

operação, desde abril de 2001, o sistema híbrido FV-diesel em Araras, com geradores a diesel de 60 kVA e 19 kVA. O que foi feito em relação a esse sistema foi analisar a qualidade da energia no ponto de conexão, e percebeu-se que os geradores a diesel dessa instalação possuem baixo THDv (menores que 1,5%). O que ocorre nesse tipo de instalação é uma maior faixa de variação quanto ao nível de tensão e quanto à frequência, o que pode provocar algumas desconexões eventuais.

A outra experiência com gerador diesel de grande porte foi no Grupo Zeppini, onde um gerador de 550 kVA é acionado todos os dias no horário de ponta e também nos momentos de falta da concessionária de energia. O gerador de 550 kVA assume a carga das duas fábricas, Fundação Estrela e Motor Z, e, devido à grande presença de cargas não lineares, a THDv é elevada (cerca de 5%). Situação semelhante a Araras, onde as faixas de variação da tensão e da frequência são maiores. Portanto, é uma condição ainda menos favorável à conexão do gerador FV.

Após a análise da qualidade de energia no ponto de conexão, foi possível ajustar alguns parâmetros dos inversores, visando à maior estabilidade na conexão, aumentando o desempenho dos SFCRs da Fundação Estrela e da Motor Z. O parâmetro de medição da impedância de rede, um dos métodos de evitar o ilhamento do gerador FV, foi apenas ajustado, mas não desabilitado. Já nos ensaios realizados com o gerador a gasolina de pequeno porte, foi necessário desabilitar esse parâmetro. Ao desabilitar ou ampliar a faixa de tolerância de determinado parâmetro, reduz-se a segurança de operação do inversor, principalmente no quesito anti-ilhamento. Porém, nos inversores da SMA utilizados nos ensaios, esta proteção tem tripla redundância, o que permite ao usuário adequar o inversor às suas necessidades.

Com o gerador a gasolina, os ensaios demonstraram a adaptabilidade dos inversores modernos, pois, apenas ajustando parâmetros, foi possível estabelecer a conexão em condições muito desfavoráveis, alto conteúdo harmônico da tensão e da corrente (THDv = 5% e THDi = 13%), e faixas de variação da tensão e da frequência também elevadas.

Alterar os parâmetros de alguns inversores enquanto o nível de penetração dos SFCR for baixo, para permitir a conexão em situações onde as dificuldades foram encontradas e identificadas, é válido. Porém, em larga escala (alto nível de penetração dos SFCR), problemas relacionados à segurança, principalmente no quesito anti-ilhamento podem ser encontrados.

Os resultados apresentados demonstram a interação entre o funcionamento dos inversores de SFCR e a qualidade da energia elétrica no ponto de conexão, e que é possível avaliar a qualidade de energia de forma amostral com o uso de um osciloscópio. A avaliação da qualidade de energia deve ser seguida de ações, caso necessário, que viabilizem a conexão do gerador FV. A hipótese inicialmente apresentada de que não se pode garantir que SFCR instalados em qualquer ponto da rede de distribuição secundária operem adequadamente, foi confirmada, bem como a de que com ações simples é possível identificar e corrigir os problemas de conexão.

Observou-se ainda que a entrada em operação dos inversores de SFCR eleva a tensão e quase sempre provoca leve redução no conteúdo harmônico da tensão, levando a uma leve melhoria na qualidade da energia na grande maioria das medições realizadas. 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. Consequentemente, a THDi será elevada, superior aos 5% previstos em norma.

Instalações com alta potência de curto-circuito, por possuírem baixa impedância, apresentam baixa THDv. Porém, se houver a presença de muitas cargas não lineares, a THDi será elevada, podendo inclusive impedir a conexão dos inversores, sendo que os mesmos rejeitam a rede elétrica, acusando falha no lado 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 e, em alguns casos extremos, pode ser necessário implementar ações que levem à melhoria na qualidade de energia da rede elétrica.

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.

Como proposto nos objetivos desta tese, foram identificados os limites de possibilidades de interconexão dos sistemas fotovoltaicos em redes de menor qualidade, através da simples alteração de alguns parâmetros de tolerância na operação dos sistemas. Demonstrou-se que para redes onde a qualidade já se encontrava fora dos padrões permitidos pela legislação a conexão não se efetiva, tendo então que o

usuário buscar meios de corrigir a qualidade independentemente de usar ou não um SFCR. Foi também demonstrado de forma experimental que, ao analisar cada caso onde a qualidade da rede ainda está dentro dos limites de aceitação normativa, é possível alterar parâmetros da configuração dos inversores para permitir a conexão.

Estes resultados indicam que as possibilidades de utilização de SFCR no Brasil com inversores importados são muito maiores do que se imaginava antes da realização deste trabalho, ao constatar simplesmente que um determinado inversor na se conectava.

A realização de um diagnóstico prévio da qualidade de energia no ponto de conexão passa a ser mais um quesito durante o anteprojeto de um SFCR, a fim de que ações corretivas quanto à qualidade de energia sejam realizadas antes mesmo da instalação do gerador FV, garantindo o bom desempenho desta forma de geração em conjunto com o sistema convencional e cumprindo o requisito de que o gerador FV deve poder injetar energia na rede elétrica pública, sempre que sobre o arranjo FV esteja incidindo radiação solar.

Ainda como recomendação, há a necessidade de que ensaios similares aos realizados no âmbito dessa tese sejam realizados também com inversores trifásicos.

Percebe-se ainda, a necessidade de que os inversores de SFCR a serem utilizados no Brasil, devam ser certificados, garantindo um padrão de desempenho compatível com o que se deseja para o país.



## REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; COLLE, S.; GLITZ, K. L. Z.; RÜTHER, R.; BEYER, H. G. **Isolated hybrid PV-diesel power plants design method: RIO 3 - World Climate & Energy Event.** Rio de Janeiro, 2003.

AIELLO, M.; CATALIOTTI, A.; FAVUZZA, S.; GRADITI, G. Theoretical and experimental comparison of total harmonic distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems. **Power Delivery, IEEE Transactions on.** Issue 3, v.21, p.1390-1397, 2006.

ANEEL. **RESOLUÇÃO Nº 505, DE 26 DE NOVEMBRO DE 2001:** 15 p. 2001.

BARBOSA, E. M. D. S.; LIMA, F. D. A.; MELO, R.; OLIVEIRA, D. **Sistema fotovoltaico conectado à rede UFPE-III: II Congresso Brasileiro de Energia Solar.** Florianópolis, 2008.

BARBOSA, E. M. D. S.; SILVA, D. O.; MELO, R. O. Sistema fotovoltaico conectado à rede com baterias - Sistema UFPE - Brasil. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente.** v.II, 2007.

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.

BENEDITO, R. S. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório.** (Dissertação de Mestrado). IEE, USP, São Paulo, 2009. 110 p.

BERTANI, A.; BOSSI, C.; FOOTE, C.; MASSUCCO, S.; SILVESTRO, F.; BUCHHOLZ, B. **Summary report on impact of power generators distributed in low voltage grid segments.** 2005.

BEYER, H. G.; RÜTHER, R.; OLIVEIRA, S. H. F. Adding PV-generators without storage to medium size stand alone diesel generator sets to support rural electrification in Brazil. p.8, 2003.

BRAUN-GRABOLLE, P. **A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana.** (Tese de

Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy**. Issue 1, v.80, p.32-45, 2006.

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.

CAAMAÑO-MARTÍN, E.; THORNYCROFT, J.; COBBEN, S.; JANTSCH, M.; ERGE, T.; LAUKAMP, H.; SUNA, D.; GAIDDON, B. **State-of-the-art on Dispersed Generation: Publications review on the impacts of PV Distributed Generation and Electricity networks**. Intelligent Energy for Europe Programme 2007.

CALAIS, M.; MYRZIK, J.; SPOONER, T.; AGELIDIS, V. G. Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview. In: Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002. **Anais.**, 2002.v.4. p. 1995-2000.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Controle & Automação. **Processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede elétrica**. Março e Abril. 2010.

CHICCO, G.; SCHLABBACH, J.; SPERTINO, F. Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations. **Solar Energy**. Issue 7, v.83, p.1026-1039, 2009.

CHIVELET, N. M.; SOLLA, I. F. **Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura**, Porto Alegre: Bookman, 2010.

CULLEN, N.; THORNYCROFT, J.; COLLINSON, A. **Risk Analysis of Islanding of Photovoltaic Power Systems Within Low Voltage Distribution Networks**. IEA - International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems, 2002.

DHERE, N. G. **Reability of PV modules and balance-of-system components**: 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Orlando, 2005.

DISPLAYBANK. **2009 Global PV Market Grew 9.1% to 6.0GW.** Disponível em: <<http://www.<http://www.displaybank.com/eng/info/sread.php?id=5728>>>. Acesso em: 17/05/2010.

DRIESSE, A.; JAIN, P.; HARRISON, S. **Beyond the curves: Modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters:** 33st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. San Diego, 2008.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes,** New York: Second edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

EPIA. **Global market outlook for photovoltaics until 2014.** Belgium, p.26, 2010.

GALDINO, M. A. **Maior sistema fotovoltaico do país conectado à rede é instalado no CEPEL.** Disponível em: <<http://www.<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/informe8.pdf>>>. Acesso em: fev/2009.

\_\_\_\_\_. **Um ano e meio de operação do sistema fotovoltaico conectado à rede do CEPEL:** X Congresso brasileiro de energia. Rio de Janeiro, 2004.

GELLER, H. S. **Revolução Energética: Políticas para um futuro sustentável.,** Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003.

GERMANY. **Act revising the legislation on renewable energy sources in the electricity sector - Act implementing Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market 2004.**

GORE, A. **Uma verdade inconveniente,** Barueri: Manole, 2006.

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 Vmpp for measurement of efficiency and Vmpp-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.

HUDSON, R. M.; BEHNKE, M. R.; WEST, R.; GONZALES, S.; GINN, J. **Design considerations for three-phase grid connected photovoltaic inverters:** 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans, 2002.

IEC-61727. **Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface:** 23 p. 2004.

IEEE-519. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems** 1992.

IEEE-929. **Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems** 2000.

JUNG, C. F. **Metodologia para pesquisa & desenvolvimento - Aplicada a novas tecnologias, produtos e processos**, Rio de Janeiro: Axcel Books do Brasil, 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.

LISITA, O. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Estudo de caso - 3kWp instalados no estacionamento do IEE-USP**. Programa de Pós-graduação em Energia, USP, São Paulo, 2005. 87 p.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**: John Wiley & Sons Ltda, 2003.

MACÊDO, W. N.; ZILLES, R. **Qualidade de energia da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede na USP: Avaliação dos parâmetros de suprimento.**: VI CLAGTEE - Congresso Latinoamericano de Generación y Transmisión de Energia Eléctrica. São Pedro - SP, 2005.

\_\_\_\_\_. **Contribuição energética de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão**: I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 2007.

\_\_\_\_\_. Influence of the power contribution of a grid-connected photovoltaic system and its operational particularities. **Energy for Sustainable Development**. Issue 3, v.13, p.202-211, 2009.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de potência: Introdução ao estudo dos conversores CC-CA**, Florianópolis: 2005.

MARTINS, D. C.; COELHO, R. F.; SANTOS, W. M. D. **Energia solar fotovoltaica**. Porto Alegre 2010.

MARTINS, F. R.; RÜTHER, R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. **Energy Policy**. Issue 8, v.36, p.2865-2877, 2008.

MAYCOCK, P.; BRADFORD, T. **PV technology, performance, and cost**. Prometheus Institute, 2007.

MEINHARDT, M.; CRAMER, G. Past, present and future of grid connected photovoltaic- and hybrid-power-systems. In: Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, 2000. **Anais.**, 2000.v.2. p. 1283-1288 vol. 2.

MOSS, H. **Energias solar e eólica: Estado atual e perspectivas no Brasil**. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20080415\\_bndes.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/apresentacoes/20080415_bndes.pdf)>. Acesso em: fev/2009.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração distribuída de eletricidade: Inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo**. USP, São Paulo, 2002. 198 p.

PAATERO, J. V.; LUND, P. D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. **Renewable Energy**. Issue 2, v.32, p.216-234, 2007.

PATTERSON, W. NATURE. **Fifty years of hopes and fears**. October. p.664, 2007.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos: 2006.

PERLIN, J. **From space to earth: the story of solar electricity**, Michigan: AATEC publications, 1999.

PHOTON-INTERNATIONAL. **1 GW in sight**. march, 2010a.

\_\_\_\_\_. **Disappointing developments**. march, 2010b.

\_\_\_\_\_. **Full of potential**. march, 2010c.

\_\_\_\_\_. **Surprise, surprise**. march, 2010d.

PINHO, J. T. **Uma viagem fotovoltaica pelo Brasil**. Rio de Janeiro 2005.

RAMPINELLI, G. A.; DIAS, J. B.; KRENZINGER, A. **Ensaio de inversores para conexão à rede: Fator de potência e distorção harmônica: II Congresso Brasileiro de Energia Solar - II CBENS2008**. Florianópolis, 2008.

RAUEN, F. J. **Roteiros de investigação científica**, Tubarão: Unisul, 2002.

REN21. **Renewables 2007 - Global Status Report**. p.54, 2007.

\_\_\_\_\_. **Renewables 2009 update - Global Status Report**. p.32, 2009.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**, O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública. LABSOLAR Florianópolis: Editora da UFSC, 2004a.

\_\_\_\_\_. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**., Florianópolis: UFSC, 2004b.

\_\_\_\_\_. **Energia solar fotovoltaica**. Florianópolis. 2006. (PPGEC - UFSC)

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. (Tese de Doutorado). Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2009. 150 p.

SANTOS, Í. P. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista**. (Dissertação de Mestrado). Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2009. 110 p.

SANTOS, I. P.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Energia Solar Fotovoltaica Como Fonte Complementar de Energia Elétrica para Residências na Busca da Sustentabilidade: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - XII ENTAC2008**. Fortaleza, 2008.

SCHIMPF, F.; NORUM, L. E. **Grid connected converters for photovoltaic, state of the art, ideas for improvement of transformerless inverters: Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics**. Noruega, 2008.

SCHMIDT, H.; BURGER, B.; KIEFER, K. **Wechselwirkungen zwischen Solarmodulen und Wechselrichtern**. Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg, 2007.

SCHNEIDER. **Workshop Instalações elétricas de baixa tensão - Qualidade de energia - Harmônicas**. p.19, 2003.

SIDRACH-DE-CARDONA, M.; CARRETERO, J. Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems. **Solar Energy Materials and Solar Cells**. Issue 1-4, v.87, p.529-540, 2005.

SMA. **Sunny boy and sunny mini central solar inverters for photovoltaic plants**: 70 p. 2005.

\_\_\_\_\_. **Course of inverter SMA**. Niestetal 2008a.

\_\_\_\_\_. **Grid connection - Influence of the grid conditions in terms of connected power of PV inverters**: 4 p. 2008b.

\_\_\_\_\_. **Sunny family 2008/2009**: 180 p. 2008c.

\_\_\_\_\_. **Intercâmbio Eletromecânico.** Disponível em: <<http://www.sunnyportal.com/Templates/PublicPageOverview.aspx?plant=e03a4e45-e55e-48e2-b6ef-afe8b6c61181&splang=pt-BR>>. Acesso em: 02/2009.

\_\_\_\_\_. **Sunny family 2009/2010:** 200 p. 2009b.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia de módulos:** 8 p. 2009c.

SOUZA, K. C. A.; MARTINS, D. C. A single-phase active power filter based in a two stages grid-connected PV system. In: Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th, 2008. **Anais.**, 2008.v.p. 1951-1956.

THOMSON, M.; INFIELD, D. G. Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems. **Renewable Power Generation, IET.** Issue 1, v.1, p.33-40, 2007.

VERHOEVEN, B. **Probability of islanding in utility networks due to grid connected photovoltaic power systems.** IEA PVPS, p.67, 2002.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil.** (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

VIANA, T. S.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Potencial de sistemas fotovoltaicos concentradores no Brasil:** II Congresso Brasileiro de Energia Solar - II CBENS2008. Florianópolis, 2008.

WENZEL, B. **What electricity from renewable energies costs.** Federal Ministry for the Environment, Nature conservation and Nuclear safety. Berlin, 2007.

ZEINELDIN, H. H.; ABDEL-GALIL, T.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT. **Electric Power Systems Research.** Issue 2, v.77, p.155-162, 2007.

ZILLES, R. **Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos.** Brasília 2009.



**APÊNDICE**✓ Trabalhos completos publicados em anais de congressos:

RÜTHER, R.; NASCIMENTO, L. R.; URBANETZ, J.; PFITSCHER, P.; VIANA, T. S. **Long-term Performance of the First Grid-connected, Building-integrated a-Si PV Installation in Brazil:** 35rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference - June 20-25- Hawaii, 2010.

RÜTHER, R.; NASCIMENTO, L. R.; URBANETZ, J.; PFITSCHER, P.; VIANA, T. S. **Performance Assessment of a Microcrystalline PV Installation in a Warm Climate:** 35rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference - June 20-25- Hawaii, 2010.

URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Qualidade de Energia Elétrica e o Funcionamento de Inversores de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede:** III Congresso Brasileiro de Energia Solar - III CBENS2010. Belém, 2010.

VIANA, T. S.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Potencial de Sistemas Fotovoltaicos Concentradores no Brasil:** II Congresso Brasileiro de Energia Solar - II CBENS2008. Florianópolis, 2008.

MONTENEGRO, A. A.; MONTEIRO, C.; BORGES, E.; KLAUS, W.; SCHWAB, T.; URBANETZ, J.; NASCIMENTO, L. R.; RÜTHER, R. **Análise de Dados de Monitoramento de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares Instalados no Acre:** II Congresso Brasileiro de Energia Solar - II CBENS2008. Florianópolis, 2008.

SANTOS, I. P.; URBANETZ, J.; RÜTHER, R. **Energia Solar Fotovoltaica Como Fonte Complementar de Energia Elétrica para Residências na Busca da Sustentabilidade:** XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - XII ENTAC2008. Fortaleza, 2008.

✓ Artigos completos submetidos em periódicos:

URBANETZ, J.; BRAUN, P.; RÜTHER, R. **Power Quality Analysis of a Grid-connected Photovoltaic System in Brazil:** Renewable Energy, july, 2010.

URBANETZ, J.; ZOMER, C. D.; RÜTHER, R. **Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites:** Solar Energy, july, 2010.

## ANEXOS

## ANEXO A – Valores extremos

<i>Número de observações</i> <i>n</i>	<i>Nível de significância</i> <i>5%</i>	<i>Nível de significância</i> <i>2,5%</i>	<i>Nível de significância</i> <i>1%</i>
3	1,15	1,15	1,15
4	1,46	1,48	1,49
5	1,67	1,71	1,75
6	1,82	1,89	1,94
7	1,94	2,02	2,1
8	2,03	2,13	2,22
9	2,11	2,21	2,32
10	2,18	2,29	2,41
11	2,23	2,36	2,48
12	2,29	2,41	2,55
13	2,33	2,46	2,61
14	2,37	2,51	2,66
15	2,41	2,55	2,71
16	2,44	2,59	2,75
17	2,47	2,62	2,79
18	2,50	2,65	2,82
19	2,53	2,68	2,85
20	2,56	2,71	2,88
21	2,58	2,73	2,91
22	2,6	2,76	2,94
23	2,62	2,78	2,96
24	2,64	2,8	2,99
25	2,66	2,82	3,01
30	2,75	2,91	
35	2,82	2,98	
40	2,87	3,04	
45	2,92	3,09	
50	2,96	3,13	
60	3,03	3,2	
70	3,09	3,26	
80	3,14	3,31	
90	3,18	3,35	
100	3,21	3,38	

## ANEXO B - Distribuição de Student

n	v	$\alpha$							X
		0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,001	0,0005	
2	1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	318,289	636,578	0,012
3	2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,328	31,600	0,162
4	3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,214	12,924	0,395
5	4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610	0,649
6	5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,894	6,869	0,908
7	6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959	1,169
8	7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,408	1,430
9	8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041	1,692
10	9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781	1,954
11	10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587	2,216
12	11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437	2,477
13	12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318	2,738
14	13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221	3,001
15	14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140	3,260
16	15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073	3,523
17	16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015	3,782
18	17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965	4,043
19	18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,610	3,922	4,304
20	19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883	4,566
21	20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850	4,826
22	21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819	5,085
23	22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792	5,347
24	23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,768	5,606
25	24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745	5,868
26	25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725	6,127

27	26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707	6,387
28	27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,689	6,650
29	28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674	6,914
30	29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,660	7,174
$\infty$	$\infty$	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,091	3,291	8,070

Obs:  $X = \frac{n}{t_\alpha^2}$

