

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

FABIANO MEIER

ROBSON CAVAGNARI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM BAIXA TENSÃO**

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2013

FABIANO MEIER

ROBSON CAVAGNARI DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM BAIXA TENSÃO**

Monografia de Conclusão de Curso de Especialização em Eficiência Energética, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial de avaliação para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Professor Jair Urbanetz Junior,
Dr. Eng.

CURITIBA

2013

TERMO DE APROVAÇÃO

FABIANO MEIER

ROBSON CAVAGNARI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM BAIXA TENSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 20 de setembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Eficiência Energética. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 05 de novembro de 2013.

Prof. Luiz Amilton Peplow, M. Eng.

Coordenador de Curso de Especialização em Eficiência Energética
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

Prof^a Rosangela Winter

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Joaquim Eloir Rocha

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Jair Urbanetz Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Gerson Maximo Tiepolo

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luiz Amilton Peplow

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

O presente Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pela saúde, disciplina e despertar da vontade em nós de realizar este trabalho, da melhor maneira possível, como forma de conclusão de anos de estudos e dedicação.

Aos nossos pais, por terem nos guiado em boa parte de nossas vidas no caminho correto, da dedicação ao estudo, do trabalho, da solidariedade e do amor ao próximo.

Aos nossos familiares esposa, filhos e irmãos, por compreenderem nossas ausências aos seus lados em momentos importantes, pois foi preciso dedicar esses momentos aos estudos.

Por todo o apoio e ensinamento que recebemos dos professores desta instituição, no decorrer de toda esta jornada acadêmica, nossos sinceros agradecimentos, em especial ao nosso orientador Jair Urbanetz Jr e à banca examinadora formada pelos professores Gerson Tiepolo, Luiz Amilton Peplow e Joaquim Eloir Rocha.

Aos profissionais do Departamento de Automação da Copel Distribuição, que contribuíram com informações à respeito da planta piloto da Copel, à Eng^a. Flávia Martinelli da Silva, pelas contribuições relativas ao Escritório Verde da UTFPR, e a todos que, direta ou indiretamente nos auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho e conseqüentemente na nossa especialização acadêmica.

Sem todas essas importantes pessoas acima mencionadas, assim como todos os colegas que por nosso convívio passaram ou ficaram, este sonho não poderia ser realizado.

A todos vocês, nosso sincero muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho aborda a qualidade de energia elétrica presente nas conexões de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição das Concessionárias. Um dos equipamentos imprescindíveis para esta conexão é o inversor. Para entregarem energia à rede, os inversores injetam uma forma de onda de corrente que na teoria deveria se apresentar puramente senoidal, mas devido à grande variedade de tecnologias de inversores e do percentual de potência que está sendo injetada na rede em relação à sua potência nominal, esta corrente apresenta certo nível de distorção. Da mesma forma para a onda senoidal de tensão, a qualidade tanto do inversor quanto da rede elétrica onde o inversor é conectado, apresentam impacto relevante na qualidade da onda de tensão do inversor. Atualmente tem-se um número muito reduzido de instalações desta natureza em operação no Brasil, o que dificulta a análise mais aprofundada do seu comportamento. Com a publicação do módulo 8 do PRODIST e da Resolução Normativa nº 482/2012, ambas pela ANEEL, tem-se um grande avanço nesta área, permitindo que o interesse por este modelo de conexão seja ampliado e com regras factíveis e claras à todos os interessados no assunto. A busca pela identificação dos fatores que possam vir a afetar ou impossibilitar a conexão ou o desempenho do Sistema Fotovoltaico com Conexão à Rede no Brasil, é de extrema relevância para que esta fonte de geração não seja apenas uma promessa futura na diversificação da matriz energética Brasileira.

Palavras chave: Qualidade de Energia; Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede;

ABSTRACT

This paper deals with the quality of electric power connections present in Photovoltaic Systems to Distribution Network of Dealers. One of the essential equipment for this connection is the inverter. To deliver power to the grid, the inverter injects a waveform of current in theory should perform purely sinusoidal, but due to the wide variety of technologies inverters and the percentage of power being injected into the network in relation to its nominal power, this current has a certain level of distortion. Likewise for the sine wave voltage, the quality of both the inverter as the mains where the inverter is connected, have a significant impact on the quality of the voltage wave inverter. Currently has very few facilities of this nature operating in Brazil, which makes further analysis of their behavior. With the publication of the module 8 PRODIST and Normative Resolution No. 482/2012, both by ANEEL, has been a major breakthrough in this area, allowing the interest in this connection model is expanded and rules feasible and clear to all interested in the subject. The search for the identification of factors that may affect or preclude the connection or the performance of Photovoltaic System with Network Connection in Brazil, it is extremely important for this generation source is not just a future promise to diversify the Brazilian energy matrix .

Keywords: Power Quality; Photovoltaic System Connected to Network;

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Irradiância Solar entre os dias 12/10/2012 e 26/12/2012	43
Gráfico 2 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 14/10/2012.....	44
Gráfico 3 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 14/10/2012	45
Gráfico 4 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 14/10/2012	46
Gráfico 5 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 23/10/2012.....	47
Gráfico 6 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 23/10/2012	48
Gráfico 7 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 23/10/2012	48
Gráfico 8 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 15/10/2012.....	49
Gráfico 9 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 18/10/2012.....	50
Gráfico 10 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 15/10/2012	51
Gráfico 11 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 18/10/2012	51
Gráfico 12 - Tensão e corrente na saída do inversor SB2500	52
Gráfico 13 - Componentes Harmônicos de Tensão no ponto de conexão na fase C....	53
Gráfico 14 - Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor	54
Gráfico 15 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 15/10/2012	55
Gráfico 16 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 18/10/2012	55
Gráfico 17 - Componentes harmônicos da tensão VAB no quadro elétrico.....	56
Gráfico 18 - Componentes harmônicos da corrente IA no quadro elétrico 1	57
Gráfico 19 - Tensão VAB e corrente IA medidos no quadro elétrico 1	57
Gráfico 20 – Potência e Irradiância no Barramento Geral.....	59
Gráfico 21 – Corrente e Irradiância no Barramento Geral	60
Gráfico 22 – Tensão da rede e Irradiância no Barramento Geral	60
Gráfico 23 – Curvas das Potências no Barramento Geral	61
Gráfico 24 – Curva do Fator de potência e da Potência Ativa no Barramento Geral...	62

Gráfico 25 - Curva de Irradiância Solar entre os dias 22/08/2012 e 27/08/2012	65
Gráfico 26 - Curva das tensões da Fase A e B e da Irradiância no dia 23/08.....	66
Gráfico 27 - Curva da tensão de linha e da Irradiância no dia 23/08	67
Gráfico 28 - Curva da Potência Ativa e da THDv (Fase A) no dia 23/08.....	68
Gráfico 29 - Curva da Potência Ativa e da THDv (Fase B) no dia 23/08	68
Gráfico 30 – Curva da Potência Ativa, da THDv e THDi (Fase A) no dia 23/08.....	69
Gráfico 31 - Curva da Tensão de Linha, da THDv e THDi (Fase B) no dia 23/08.....	70
Gráfico 32 – Curva da Potência Ativa e do Fator de Potência no dia 23/08	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV	22
Tabela 2 – Terminologia.....	24
Tabela 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	25
Tabela 4 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.....	25
Tabela 5 – Resposta às condições anormais de tensão	27
Tabela 6 – Limite de distorção harmônica de corrente.....	28
Tabela 7 – Eficiência dos Painéis Fotovoltaicos	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Forma de onda para inversor monofásico	30
Figura 2 – Forma de onda típica de um inversor tipo PWM	31
Figura 3– Curva de operação em função da frequência para desconexão	33
Figura 4 – Curva do Fator de potência em função da potência de saída do inversor ...	34
Figura 6– Limites operacionais de injeção de potência superior a 6KW	34
Figura 6 – Suportabilidade a sobtensões oriundas de falhas na rede.....	35
Figura 7 – Detalhe da instalação dos Painéis Fotovoltaicos	36
Figura 8 – Detalhe da instalação dos Inversores	37
Figura 9 – Detalhe geral das Instalações dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede e Isolado.	41
Figura 10 - Vista frontal do EV da UTFPR.....	63
Figura 11 – Painel Fotovoltaico e inversor do EV da UTFPR	64

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO	13
1.1	TEMA	13
1.1.1	Delimitação do Tema	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivos Gerais	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	INTRODUÇÃO	17
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	17
2.2	BREVE SITUAÇÃO ATUAL DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS	19
3	REQUISITOS DE QUALIDADE	20
3.1	CONCEITO	20
3.2	PRODIST	21
3.2.1	Tensão em Regime Permanente	22
3.2.2	Fator de Potência	23
3.2.3	Harmônicos pelo PRODIST	23
3.3	NORMAS ABNT NBR	25
3.3.1	Harmônicos pela ABNT	27
3.3.2	Fator de Potência	28
3.4	SISTEMAS CONECTADOS À REDE	29
3.4.1	Inversor	29
3.4.2	Normas Técnicas das Concessionárias de Energia Elétrica	32
4	METODOLOGIA	36

4.1	SISTEMA COPEL.....	36
4.1.1	Conceito.....	36
4.1.2	Equipamentos Utilizados.....	38
4.1.2.1	Painéis fotovoltaicos.....	38
4.1.2.2	Inversores Xantrex e CP Eletronica Utilizados.....	40
4.1.3	Resultados Operacionais dos Sistemas.....	42
4.1.3.1	Medições de qualidade de energia.....	42
4.1.3.2	Medições de qualidade de energia inversor Xantrex.....	43
4.1.3.3	Medições de qualidade de energia Inversor CP Eletrônica.....	58
4.1.3.4	Medições de qualidade de energia dos inversores em paralelo.....	58
4.2	SISTEMA ESCRITÓRIO VERDE.....	62
4.2.1	Conceito.....	62
4.2.2	Equipamentos Utilizados.....	63
4.2.3	Resultados Operacionais do Sistema.....	64
4.2.3.1	Medições de qualidade de energia.....	64
4.2.3.2	Medições de qualidade de energia no inversor.....	65
5	CONCLUSÃO.....	72

1 APRESENTAÇÃO

1.1 TEMA

1.1.1 Delimitação do Tema

O tema de pesquisa proposto neste documento trata de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão. Por serem cada vez mais utilizados, os sistemas de geração de energia elétrica através da luz solar, requerem estudos e cuidados em especial.

O estudo se destina à análise de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede, sendo um deles o projeto piloto da Concessionária Paranaense de Energia Elétrica, e o segundo do Escritório Verde da UTFPR.

Os Sistemas Fotovoltaicos vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética brasileira. Os diversos sistemas instalados demonstram sua eficácia e o seu devido tempo de retorno, de modo que para o Brasil, tais projetos mostram-se mais atrativos hoje em dia.

O objetivo principal é apresentar o comportamento de algumas grandezas elétricas quando da conexão permanente de inversores de potência à rede de distribuição de baixa tensão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Analisar a qualidade de energia de forma a permitir o correto dimensionamento e a correta instalação dos sistemas fotovoltaicos, não ocasionando problemas na qualidade da energia elétrica gerada e injetada na rede, como também não intensificando eventuais problemas que já existam na que se deseja conectar.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantar dados inerentes ao comportamento de inversores de Sistemas Fotovoltaicos conectados em paralelo com os sistemas de distribuição de energia elétrica em baixa tensão;
- Descrever os principais tipos de equipamentos que compõe um sistema fotovoltaico destinado à conexão na rede em baixa tensão;
- Subsidiar a avaliação por parte dos interessados no tema, quanto à qualidade de energia que é injetada nos sistemas de distribuição de baixa tensão.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede são sistemas de geração descentralizada de energia que utilizam o Sol como fonte primária de energia. Diferentemente das grandes usinas geradoras, que geram quantidades expressivas de energia em um local normalmente distante dos centros consumidores, os sistemas de geração descentralizada fornecem energia próximo ao local de consumo (BRASIL.GOV, 2013).

A geração distribuída pode proporcionar a minimização das quedas de tensão e perdas nas linhas de distribuição, já que a geração e o consumo são, em termos práticos, realizadas no mesmo ponto. Para o caso da energia solar fotovoltaica, instalações com perfil diurno (sistemas de refrigeração, por exemplo) podem ter as sobrecargas evitadas, visto que o horário de ponta da demanda nestas instalações corresponde ao horário de geração máxima do sistema fotovoltaico.

É importante ressaltar, que a geração distribuída não tem como objetivo fornecer energia para o consumo quando a rede da concessionária por qualquer motivo apresentar problemas, ou seja, sem energia da concessionária o sistema fotovoltaico deve se desconectar.

As concessionárias de energia seguindo a resolução da ANEEL tratam o sistema como compensação de energia, ou seja, o consumidor outrora e agora acessante, poderá consumir energia elétrica da concessionária quando o sistema fotovoltaico não estiver produzindo seja no período da noite o dias com baixa irradiância, e fornecer energia para a

concessionária no período de alta irradiância, ficando a cargo do acessante pagar pela diferença de consumo e em caso de gerar mais do que consumir, ficará com créditos para ajustes nas próximas faturas (COPEL, 2012), (AMPLA, 2012).

Esta descentralização das gerações, em especial o micro e mini geradores conforme a própria Resolução Normativa N°482/2012 assim trata, obriga por parte principalmente das concessionárias de distribuição de energia, que os requisitos técnicos de qualidade de energia sejam bem claros e realmente cumpridos, para que esta nova tendência de geração de energia possa proporcionar ganhos em vários sentidos, e não complicações futuras aos acessantes de geração, como também aos consumidores de energia que se conectam no mesmo circuito de distribuição. Olhando por esta perspectiva, este trabalho se justifica, pois busca justamente subsidiar os estudos e as conclusões que as distribuidoras de energia estão levantando a respeito deste importante tema (ANEEL, 2012).

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos para o estudo são:

- Estudo dos sistemas fotovoltaicos a serem verificados e suas características técnicas;
- Análise dos dados obtidos das medições realizadas no sistema fotovoltaico da Copel e do Escritório Verde;
- Comparação dos dados compilados com os requisitos exigidos para estes sistemas.

O tipo de pesquisa em relação aos objetivos foi exploratório em todo o seu desenvolvimento, e explicativa quando das análises conclusivas efetuadas. Já em relação ao tipo de pesquisa do objeto de estudo e técnicas de apreensão, foram em campo e também bibliográficas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

- Apresentação do projeto
- Levantamento dos requisitos de qualidade
- Detalhamento dos principais elementos de um sistema de geração fotovoltaico
- Descrição do sistema fotovoltaico da Copel
- Medições de qualidade do sistema Copel
- Descrição do sistema fotovoltaico do Escritório Verde
- Medições de qualidade do sistema Escritório Verde
- Conclusões

2 INTRODUÇÃO

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A geração de energia elétrica atualmente no Brasil é predominante hidráulica. E dessa fonte de energia a grande maioria trata-se de plantas geradoras de porte acentuado e instaladas em locais, na maioria dos casos, distantes dos centros de carga. Mesmo para as pequenas centrais hidrelétricas – PCH, em função da sua característica que é também de represar a água de um determinado rio, depara-se com o mesmo problema referente à sua distância das cidades (ANEEL, Energia Hidráulica).

Em menor escala, existem as fontes térmicas a base da queima de combustíveis como o derivado de petróleo, o gás natural, o carvão mineral e a biomassa, para gerar a energia elétrica. Para estas usinas, uma vantagem da sua instalação próxima das grandes cargas e/ou cidades, porém, existe o problema da poluição gerada, além de se tratar de uma energia mais cara (CCEE, 2013).

Outra fonte de relativa importância é a nuclear. Essa fonte tem como principal ponto negativo as graves consequências para o homem e o meio ambiente no caso de um eventual acidente e esta discussão está presente na maioria dos eventos relacionados com energia pelo mundo (CCEE, 2013).

É importante enfatizar também outra fonte que nos últimos anos vem ganhando bastante espaço dentro da matriz energética brasileira, que é a energia eólica. Com grandes incentivos por parte do governo, esta fonte vem se destacando inclusive com a abertura leilões de energia exclusivos. Seu preço para implantação reduziu muito, principalmente com a instalação dos grandes parques eólicos. Trata-se de uma fonte que tem sua instalação em locais um pouco mais acessíveis e que muitas vezes está próximo dos principais centros de carga. Dessa forma, para este tipo de fonte, o que se pode chamar de geração distribuída, ou seja, uma fonte de energia que fica conectada à rede de distribuição da concessionária, bem próximo aos consumidores (BRASIL.GOV, 2013).

Percebe-se um grande apelo para aplicação de fontes de energia limpa, de forma que as regras para estas conexões estão cada vez mais amenas, permitindo inclusive que outras fontes com estas características ganhem espaço. É aí que se pode perceber a entrada dos Sistemas Fotovoltaicos conectados diretamente à rede de energia elétrica das concessionárias. Como há alguns anos atrás aconteceu com a fonte de energia eólica, hoje acontece com a energia fotovoltaica. Primeiramente, o preço para a implantação de um sistema como este que até pouco tempo atrás era totalmente proibitivo, e hoje já mostra claros sinais de competitividade (ANEEL, Energia Solar).

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a Resolução Normativa N°482, a qual estabelece os critérios técnicos e comerciais para a conexão de micro e mini geradores de energia elétrica às redes de distribuição. Como principal fonte a se beneficiar desta resolução, pode-se citar a energia fotovoltaica (ANEEL, 2012).

A possibilidade de gerar energia elétrica a partir de módulos fotovoltaicos em telhados das edificações só tem a contribuir com a redução dos problemas inerentes às formas convencionais de geração, conforme já citado anteriormente. Uma vez que os custos baixem um pouco mais e se tornem claramente competitivos em relação à geração convencional, esta fonte de geração deverá ter maior participação nos centros urbanos. Estes sistemas fotovoltaicos possuem baixo impacto ambiental e produzem energia através de uma fonte renovável, já utilizada em países desenvolvidos desde o início dos anos 80. No Brasil, considerando a radiação solar média e a grande extensão territorial, pode ser amplamente aplicada (ANEEL, Energia Solar).

Neste interim, não se pode deixar de analisar, certificar e supervisionar um importante equipamento que faz parte tanto das fontes de energia eólica, como da fonte de energia fotovoltaica, os inversores. Os inversores fotovoltaicos (inversores CC-CA) são equipamentos que convertem, com alta eficiência e qualidade de energia, a tensão contínua (CC), gerada nos painéis fotovoltaicos, em tensão alternada (CA), injetando a energia gerada na rede de alimentação. Assim, conhecer a qualidade da energia no ponto onde se deseja fazer a conexão de um sistema fotovoltaico passa a ser mais um quesito muito importante a ser considerado durante o projeto de um Sistema Fotovoltaico a ser conectado à rede de distribuição em baixa tensão. O que também não se pode deixar de ser avaliado, dependendo do porte do inversor instalado, é a sua influência sobre os parâmetros de qualidade de energia da rede onde o inversor é conectado (URBANETZ JR, 2010).

2.2 BREVE SITUAÇÃO ATUAL DAS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS

A conversão de energia solar em energia elétrica foi verificada pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839 onde constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor quando exposto a luz. Em 1876 foi montado o primeiro aparato fotovoltaico resultado de estudos das estruturas no estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial seguindo o desenvolvimento da microeletrônica. Neste ano a utilização de fotocélulas foi de papel decisivo para os programas espaciais. Com este impulso, houve um avanço significativo na tecnologia fotovoltaica onde se aprimorou o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso. Com a crise mundial de energia de 1973 e 1974, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais, mas que fosse intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia (CRESESB, 2004).

Um dos fatores que impossibilitava a utilização da energia solar fotovoltaica em larga escala era o alto custo das células fotovoltaicas. As primeiras células foram produzidas com o custo de US\$600/W para o programa espacial. Com a ampliação dos mercados e várias empresas voltadas para a produção de células fotovoltaicas, o preço está reduzindo ao longo dos anos podendo ser encontrados hoje, no Brasil, módulos Fotovoltaicos a menos do que R\$ 5,00/Wp (CRESESB, 2004).

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica, estejam integradas e trabalhando em conjunto (CRESESB, 2004).

3 REQUISITOS DE QUALIDADE

3.1 CONCEITO

O conceito de qualidade de energia elétrica está relacionado a um conjunto de alterações que pode ocorrer no sistema elétrico. Tais alterações geralmente provocam redução de vida útil e mau funcionamento dos equipamentos instalados.

Uma definição mais abrangente define Qualidade de Energia como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores. Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema fornecedor como das cargas elétricas. Entre os parâmetros a considerar tem-se as distorções harmônicas, o fator de potência, as flutuações de tensão, as variações de tensão de curta duração, os desequilíbrio de sistemas trifásicos e os transitórios rápidos (ANEEL, 2012).

Esses parâmetros estão relacionados também a eficiência energética a qual busca, por exemplo, à minimização das perdas na conversão de energia primária em energia útil. As perdas ocorrem para qualquer tipo de energia, seja térmica, mecânica ou elétrica. A ênfase no aumento da eficiência e na produtividade do sistema elétrico como um todo tem resultado no crescimento da aplicação de equipamento e dispositivos tais como motores com alta eficiência, com velocidade variável, e de capacitores para correção do fator de potência, mas trazendo como consequência problemas adicionais de qualidade de energia.

Nas indústrias o aumento da eficiência tem resultado no avanço do grau de automação dos processos e na utilização de equipamentos mais modernos, eletrônicos, os quais são normalmente muito mais sensíveis a variações de tensão que os dispositivos mais antigos. Há que se ressaltarem os impactos econômicos em empresas de energia e em consumidores industriais, bem como os diversos custos indiretos associados a problemas de qualidade de energia (COPEL, 2005).

3.2 PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição – PRODIST, tratam-se de um conjunto de módulos que estabelecem as diretrizes em relação à diversos assuntos referentes ao setor elétrico, mais especificamente aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

Quando se fala em Qualidade de Energia, apresenta-se no Módulo 8 os requisitos específicos a serem considerados. Ele estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de Qualidade de Energia.

Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Os procedimentos de qualidade de energia elétrica definidos no módulo 8 devem ser observados por consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição, produtores de energia, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores de energia elétrica e transmissoras detentoras de demais Instalações de Transmissão.

Os fenômenos de Qualidade de Energia que são abordados neste módulo em regime permanente ou transitório são:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

Destacam-se a seguir, a tensão em regime permanente, o fator de potência e os harmônicos, por se tratarem neste momento dos fenômenos que mais estão presentes e mais causam impactos quando da conexão de Sistemas Fotovoltaicos (ANEEL, 2012).

3.2.1 Tensão em Regime Permanente

São estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, os critérios de medição e registro, os prazos para regularização e de compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores.

O termo “conformidade de tensão elétrica” refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários e críticos.

A tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, de acordo com a metodologia descrita para os indicadores individuais e coletivos. A conformidade dos níveis de tensão deve ser avaliada, nos pontos de conexão à Rede de Distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras, por meio dos indicadores estabelecidos neste Módulo.

Com relação as tensões contratadas junto à distribuidora, a tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes de geração atendidos em tensão igual ou inferior a 1 kV deve ser a tensão nominal do sistema. Considerando, por exemplo, a tensão nominal do sistema elétrico de baixa tensão da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, tem-se na tabela 1 as faixas de variação de tensão permitida:

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1kV
Fonte: COPEL (2012, NTC 905100)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

3.2.2 Fator de Potência

Para a metodologia de medição dos valores reativos devem ser utilizados instrumentos de medição adequados, preferencialmente eletrônicos, empregando o princípio da amostragem digital e aprovados pelo órgão responsável pela conformidade metrológica.

O valor do fator de potência deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa ou das respectivas energias ativa e reativa.

O controle do fator de potência deverá ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição em Média Tensão e Sistema de Distribuição em Alta Tensão e nas conexões entre distribuidoras, ou por medição individual permanente e facultativa nos casos de unidades consumidoras do Grupo B com instalações conectadas pelo Sistema de Distribuição em Baixa Tensão, observando do disposto em regulamentação, levado em conta neste estudo.

Os valores de referência para unidade produtora de energia, o fator de potência deve estar compreendido entre os valores estabelecidos nos Procedimentos de Rede. Caso esta unidade produtora de energia esteja enquadrada no Sistema de Compensação de Energia de que trata a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, não há valores de referência a serem verificados.

3.2.3 Harmônicos pelo PRODIST

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

A seguir apresenta-se a terminologia, a metodologia de medição, a instrumentação e os valores de referência para as distorções harmônicas.

Na tabela 2 tem-se a terminologia aplicável às formulações do cálculo de valores de referência para as distorções harmônicas.

Tabela 2 – Terminologia
Fonte: ANEEL (MODULO 8, PRODIST - 2012).

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	DTT %
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	H _{máx}
Ordem harmônica mínima	H _{min}
Tensão fundamental medida	V_1

Apresentam-se as equações para o cálculo das grandezas $DIT_h\%$, equação 01 e DTT %, equação 02.

$$DIT_h \% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad \text{Eq. 01}$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad \text{Eq. 02}$$

Para os sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

O espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na tabela 3. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de Qualidade de Energia e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Tabela 3 Valores de referência globais das distorções harmônicas totais
Fonte: ANEEL (MODULO 8, PRODIST - 2012).

<i>Tensão nominal do Barramento</i>	<i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i>
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais indicadas na tabela 04, a seguir.

Tabela 4 Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão
Fonte: ANEEL (MODULO 8, PRODIST - 2012).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

3.3 NORMAS ABNT NBR

Com o intuito de ter um balizador de informações de abrangência e reconhecimento nacional, foi criada pela ABNT a CE-03:082.01 – Comissão de Estudo de Sistemas de conversão fotovoltaica de energia solar do ABNT/CB-03 – Comitê Brasileiro de Eletricidade, que ao longo do ano de 2012, a qual desenvolveram duas importantes normas para auxiliar os

trabalhos envolvendo a concepção ou o uso de inversores de energia para sistemas fotovoltaicos.

Uma delas é a ABNT NBR 16149:2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, e a outra é a ABNT NBR 16150:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade. A primeira norma estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos, aplicando-se aos sistemas fotovoltaicos que operam em paralelo com a rede de distribuição.

Já a Norma ABNT NBR 16150:2013 especifica os procedimentos de ensaio para verificar se os equipamentos utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia estão em conformidade com os requisitos da Norma NBR 16149. Esta Norma se aplica a conversores estáticos mono ou polifásicos utilizados em sistemas fotovoltaicos de conexão à rede elétrica, conhecidos como inversores de conexão à rede e, aos outros componentes utilizados na interface de conexão entre o sistema fotovoltaico e a rede de distribuição de energia.

Tendo em vista o alinhamento de objetivos deste trabalho e da Norma de Características da interface de conexão, detalham-se neste estudo os requisitos que estes inversores devem apresentar.

A qualidade da energia fornecida pelo sistema fotovoltaico às cargas em corrente alternada locais e à rede elétrica é regida por práticas e normas referentes à tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência. O desvio dos padrões estabelecidos por essas normas caracteriza uma condição anormal de operação, devendo o sistema fotovoltaico ser capaz de identificar esse desvio e cessar o fornecimento de energia à rede.

Todos os parâmetros de qualidade de energia (tensão, cintilação, frequência, distorção harmônica e fator de potência) devem ser medidos na interface da rede/ponto de conexão comum, exceto quando houver indicação de outro ponto.

A tensão, a potência e a frequência do sistema fotovoltaico devem ser compatíveis com a rede elétrica local. Os valores nominais de frequência e tensão estão contidos nas seções pertinentes do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede normalmente não regulam tensão, e sim a corrente injetada na rede. Portanto, a faixa operacional normal de tensão do sistema fotovoltaico é selecionada como uma função de proteção, que responde a condições anormais da rede. O sistema fotovoltaico deve operar dentro dos limites de variação de tensão definidos conforme tabela 05:

Tabela 5 – Resposta às condições anormais de tensão
Fonte: ABNT (NBR 16149, 2013).

Tensão no ponto comum de conexão (% em relação à V_{nominal})	Tempo máximo de desligamento^a
$V < 80 \%$	0,4 s
$80 \% \leq V \leq 110 \%$	Regime normal de operação
$110 \% < V$	0,2 s

1

A operação do sistema fotovoltaico não pode causar cintilação acima dos limites mencionados nas seções pertinentes da IEC 61000-3-3 (para sistemas com corrente inferior a 16 A), IEC 61000-3-11 (para sistemas com corrente superior a 16 A e inferior a 75 A) e IEC/TS 61000-3-5 (para sistemas com corrente superior a 75 A).

O sistema fotovoltaico deve parar de fornecer energia à rede em 1 segundo se a injeção de componente corrente contínua na rede elétrica for superior a 0,5 % da corrente nominal do inversor

3.3.1 Harmônicos pela ABNT

É conveniente que a energia injetada pelo sistema fotovoltaico tenha baixos níveis de distorção harmônica de corrente, para garantir que nenhum efeito adverso ocorra em outro

¹ O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e a atuação do sistema fotovoltaico (cessar o fornecimento de energia para a rede). O sistema fotovoltaico deve permanecer conectado à rede, a fim de monitor os parâmetros da rede e permitir a “reconexão” do sistema quando as condições normais forem restabelecidas.

equipamento conectado à rede. Níveis aceitáveis de distorção harmônica de tensão e corrente dependem do tipo das características da rede de distribuição, tipo de serviço, cargas conectadas e procedimentos adotados para a rede.

A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5 %, em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na tabela 06:

Tabela 6 – Limite de distorção harmônica de corrente
Fonte: ABNT (NBR 16149, 2013).

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0 %
11° a 15°	< 2,0 %
17° a 21°	< 1,5 %
23° a 33°	< 0,6 %
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0 %
10° a 32°	< 0,5 %

3.3.2 Fator de Potência

Quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de operar dentro das faixas de fator de potência definidas nas próximas subseções.

Após uma mudança na potência ativa, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para corresponder ao fator de potência predefinido.

Qualquer ponto operacional resultante destas definições/curvas deve ser atingido em, no máximo, 10 segundos. O inversor deve sair de fábrica com o fator de potência unitário.

3.4 SISTEMAS CONECTADOS À REDE

Sistemas conectados são aqueles em que o arranjo fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico, pertencente à concessionária de energia, ao qual está conectado. São sistemas que não utilizam armazenamento de energia, baterias, pois toda a potência gerada é entregue ou a carga ou a à rede instantaneamente.

Parte integrante do sistema fotovoltaico conectado à rede é o inversor.

3.4.1 Inversor

Tem a função de converter corrente contínua em corrente alternada, também conhecido como conversor CC-CA. Na sua construção devem ser respeitados itens como tensão com baixo teor de harmônicos quando em sincronismo com a rede de energia elétrica e deve-se ainda dissipar o mínimo de potência para se evitar perdas.

Existem dois tipos de conversores: conversores estáticos, conhecido como inversor e os eletromecânicos. Neste estudo será abordado apenas o conversor estático.

Comumente são encontrados inversores monofásicos em instalações de baixa potência, até a potência de 5 kW. Para potências superiores a 5 kW normalmente são aplicados os inversores trifásicos. A eficiência do inversor é mais alta para inversores com baixo índice de perdas e a eficiência aumenta diretamente proporcional a tensão de entrada em corrente contínua. A escolha de um inversor interfere no desempenho, confiabilidade e custo de um Sistema Fotovoltaico.

Para o correto dimensionamento do inversor e perfeita escolha, deve-se conhecer a carga a ser atendida, assim como oscilações da frequência da rede e nível de tensão. Distorções de tensão e de corrente podem não permitir a conexão do inversor com a rede. Ainda deve-se levar em consideração para o correto dimensionamento a potência elétrica necessária para atender a carga e para cargas com pico de partidas como motores é importante conhecer a potência de pico ou corrente de pico de partida.

Para a escolha do inversor devem-se observar os valores recomendados pelos fabricantes em seus catálogos, o fabricante SMA por exemplo apresenta eficiência de 95% a 96%.

A forma de onda que o inversor pode fornecer está diretamente relacionada com a qualidade da energia inserida na rede e com o custo do inversor. Utilizam-se filtros para eliminar os harmônicos indesejáveis que resultam do processo de conversão (CRESESB, 2004).

A figura 01 apresenta as três formas de onda mais comum: quadrada, quadrada modificada ou retangular e senoidal.

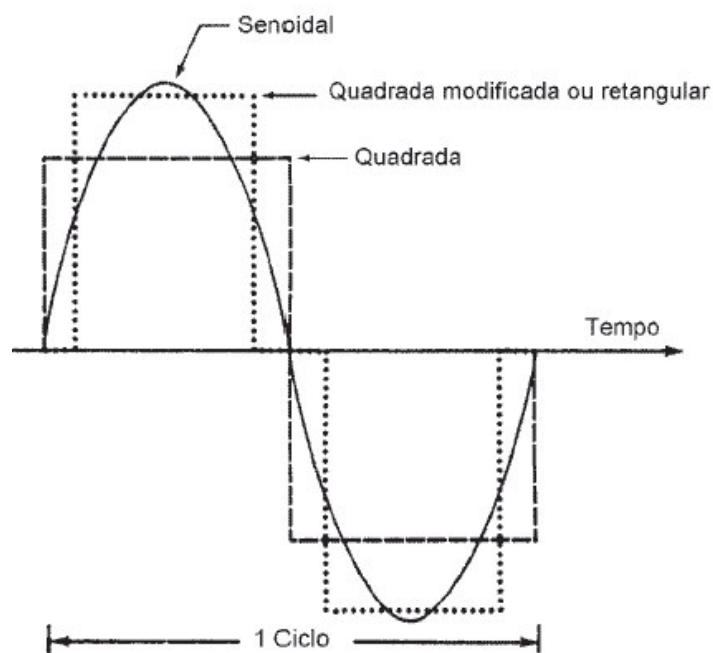


Figura 1- Forma de onda para inversor monofásico
Fonte: CRESESB (2004).

A figura 02 demonstra a forma de onda típica de um inversor tipo PWM (modulação por largura de pulso).

Modulação por largura de pulso é uma forma de controle de tensão por recorte onde os tiristores ou transistores de potência são ligados ou bloqueados de modo a obter na saída o valor de tensão desejada.

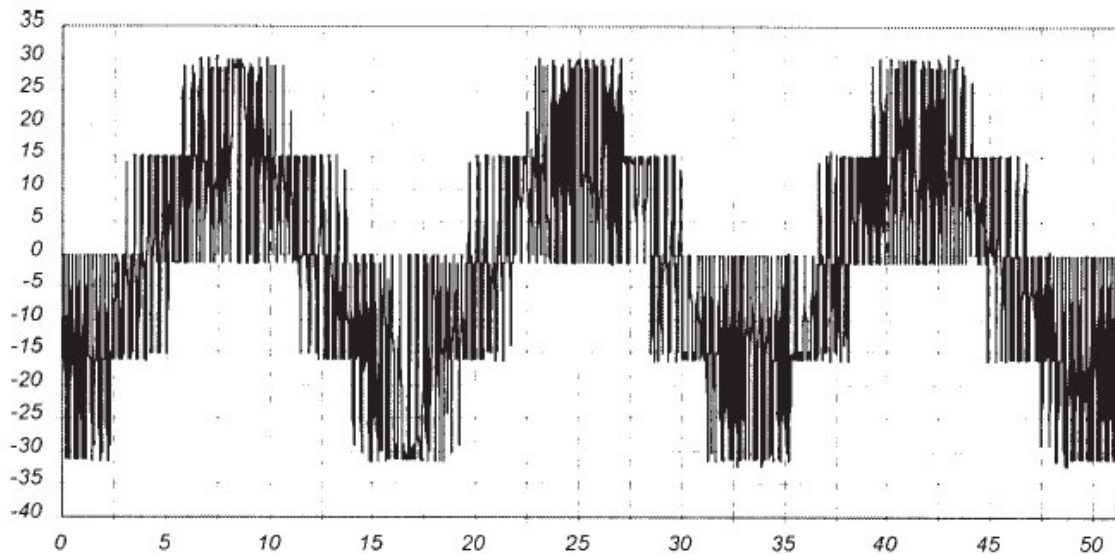


Figura 2 – Forma de onda típica de um inversor tipo PWM
Fonte: CRESESB (2004).

A seguir as características dos inversores pela forma de onda aplicada em sua construção e aplicação.

a) Sistema Fotovoltaico Isolado – Inversor com forma de onda quadrada

- Fornecem em sua saída tensão com harmônicos elevados e pequena regulação de tensão. A onda quadrada é obtida alterando-se a tensão e a corrente;
- São mais baratos, porém não devem ser usados para cargas indutivas como motores, mas são indicados para cargas resistivas, lâmpadas incandescentes;
- Quando aplicado em motores de indução, estes só conseguem atingir 60% do torque normal.

b) Sistema Fotovoltaico Isolado – Inversor com forma de onda quadrada modificada ou retangular

- É um avanço do inversor de onda quadrada, recebendo chaveamentos adicionais para se aproximar de uma onda senoidal. Possuem menor distorção harmônica que o de onda quadrada;
- Permitem que sejam ligados em circuitos com lâmpadas, equipamentos eletrônicos, e uma grande gama de motores elétricos;
- Permite melhor torque nos motores do que os inversores de onda quadrada;

c) Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede - Inversor com forma de onda senoidal

- São mais caros que os dois citados anteriormente, mas proporcionam uma tensão de saída e desempenho melhores;
- Podem ser instalados para atender uma grande gama de cargas incluindo motores, respeitando-se os níveis de tensão e potência;
- Utilizam normalmente a modulação por largura de pulso e filtros para minimizar distorções harmônicas;
- Um avanço neste tipo de inversor, é aplicar a modulação por largura de pulso, assim possuem distorções harmônicas muito baixas, principalmente em configurações trifásicas e permitem a construção de inversores senoidais com filtros, sem muita complexidade, adequado para praticamente todas as cargas.

Os melhores inversores são projetados para compensarem as cargas indutivas e manterem o fator de potência próximo da unidade, que maximiza a transferência de potência para a carga. O inversor deve ter um fator de potência nominal compatível com o fator de potência desejado para as cargas (CRESESB, 2004).

3.4.2 Normas Técnicas das Concessionárias de Energia Elétrica

Para sistemas fotovoltaicos conectados a rede em baixa tensão são aceitos, pelas concessionárias de energia, inversores com certificação INMETRO, mas como o processo de certificação pelo INMETRO ainda não está consolidado poderão ser aceitos certificação de laboratórios internacionais conveniados ao INMETRO. Os inversores devem atender aos requisitos estabelecidos na ABNT NBR 62116. A COPEL solicita ainda que os inversores sejam apresentados para homologação. Outras concessionárias com a Light, CEEE, Coelba, AES Eletropaulo, Ampla, CELG, Celesc, Celpa, Cemat, Cemig e a Enersul não exigem a homologação.

O INMETRO por meio da portaria nº 004, de 04 de janeiro de 2011, estabelece os critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, através do mecanismo da etiquetagem, para utilização da etiqueta nacional de conservação de energia.

As concessionárias de energia baseadas na ABNT NBR IEC 62116, ressaltam em suas normativas que em uma eventual falha na rede de distribuição o inversor deverá abrir e isolar a geração em no máximo 2 segundos, caracterizando como proteção contra ilhamento.

Para sistemas conectados á rede através de inversores, quando a frequência da rede assumir valores inferiores aos padrões, 57,5Hz, o fornecimento de energia para a rede deverá ser interrompido em até 0,2 segundos, após a normalização da frequência, 59,9Hz, período mínimo de 180 segundos e após a normalização da rede. Quando a frequência ultrapassar 60,5Hz e estiver abaixo de 62 Hz, o inversor deve reduzir a potência ativa injetada na rede, e assim que normalizada a frequência deve-se manter o menor valor de potência ativa registrada durante o aumento da frequência. A figura 3 ilustra a curva de operação em função da frequência da rede para desconexão por sub frequência e sobre frequência (CEEE, 2013), (AMPLA, 2012), (CELG, 2012), (LIGHT, 2012), (ENERSUL, 2012), (COPEL, 2012) e (CELESC, 2012).

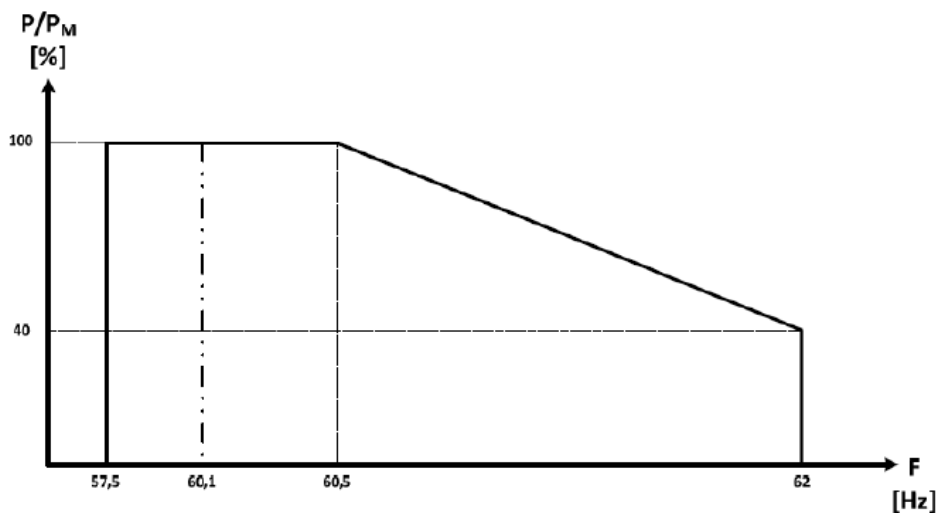


Figura 3– Curva de operação em função da frequência para desconexão
Fonte: CEEE (2012).

Inversores para sistemas fotovoltaicos com potência nominal inferior a 3kW devem possuir capacidade de absorver energia reativa assim contribuindo com o nível de tensão em regime permanente. O inversor terá que reduzir o fator de potência gradativamente em função da potência ativa de saída quando a tensão no ponto de conexão for maior ou igual a 104% do valor nominal. Chegando ao valor de potência nominal de saída o inversor deve operar com fator de potência igual a 0,95 para valores entre 3kW e 6kW e 0,90 de fator de potência para potência nominal acima de 6kW.

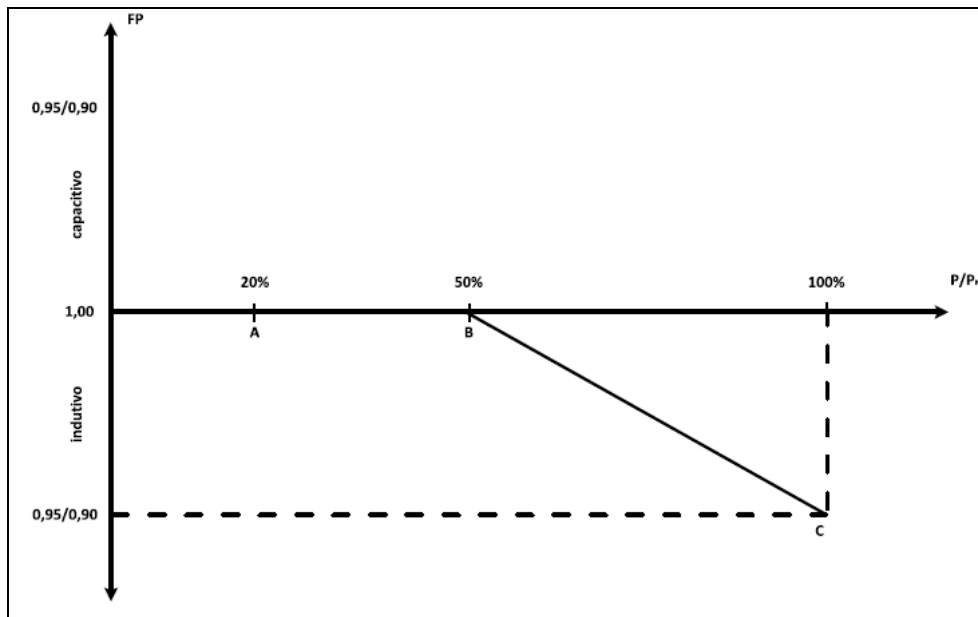


Figura 4 – Curva do Fator de potência em função da potência de saída do inversor
Fonte: CEEE (2012).

Inversores com potência nominal superiores a 6kW podem operar com potência reativa fixa ou com controle externo. Seguindo estes requisitos o inversor deve operar em qualquer ponto da área sombreada

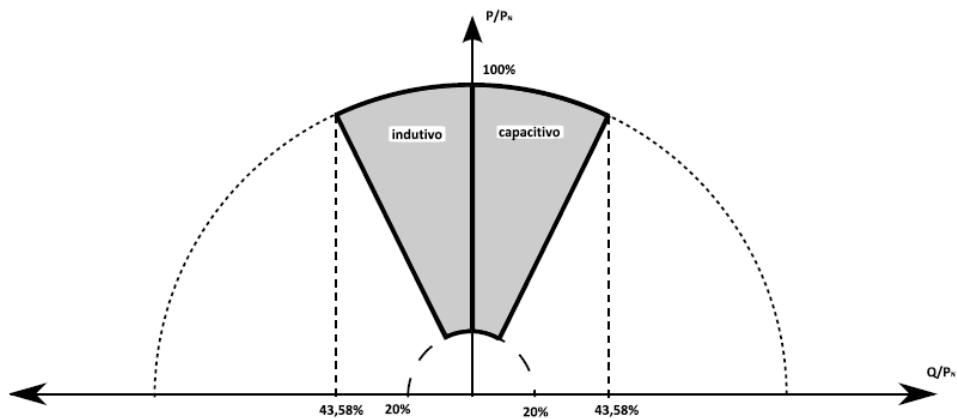


Figura 5– Limites operacionais de injeção de potência superior a 6KW
Fonte: CEEE (2012).

Inversores com potência nominal superiores a 6kW devem manter a conexão durante afundamentos de tensão no ponto de conexão. Quando afundamentos de tensão reduzir a tensão a 40% ou menos do que o valor nominal, o inversor deve permanecer conectado no mínimo por 200ms, para valores de afundamentos entre 40% e 80% da tensão nominal, o

tempo de conexão deve ser de 300ms no mínimo, para valores diferentes destes o tempo deve ser de até 400ms.

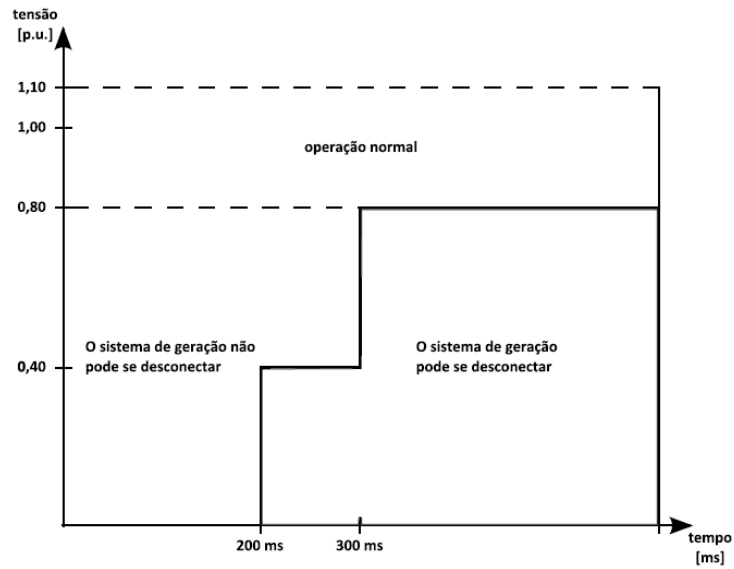


Figura 6 – Suportabilidade a sobtensões oriundas de falhas na rede.
Fonte: CEEE (2012).

4 METODOLOGIA

4.1 SISTEMA COPEL

4.1.1 Conceito

A presente pesquisa exploratória foi realizada a partir de dois sistemas fotovoltaicos instalados dentro da subestação da Companhia Paranaense de Energia – COPEL, chamada Subestação Fazenda Iguaçu, no município de Fazenda Rio Grande – PR.

Estes sistemas fotovoltaicos foram instalados no início do ano de 2012, com o intuito de se obter informações do seu comportamento energético como um todo, e em especial, avaliar as características de qualidade e de segurança dos inversores utilizados quando conectados diretamente na rede da concessionária. O sistema é apresentado nas figuras 07 e 08.



Figura 7 – Detalhe da instalação dos Painéis Fotovoltaicos
Fonte: Projeto Piloto COPEL – Sistema Fotovoltaico



Figura 8 – Detalhe da instalação dos Inversores
Fonte: Projeto Piloto COPEL – Sistema Fotovoltaico

Como já comentado neste trabalho, o apelo atual para que esta tecnologia de geração de energia seja difundida é muito grande, ainda mais depois de publicada pela ANEEL a Resolução Normativa N°482. Portanto, é de extrema importância que as concessionárias conheçam a fundo como esta nova tecnologia se comporta quando conectada ao seu sistema. Isto é facilmente justificado devido aos grandes riscos de segurança que estas conexões apresentam às pessoas que trabalham diretamente nessas redes, como também, os grandes problemas de qualidade de energia que podem apresentar ou intensificar em casos existentes (ANEEL, 2012).

E é justamente em relação a estes critérios de qualidade que este estudo está direcionado. Aborda-se o comportamento das principais grandezas de energia elétrica que são injetadas na rede da concessionária e as suas influências.

4.1.2 Equipamentos Utilizados

4.1.2.1 Painéis fotovoltaicos

Antes da concepção do sistema foram realizadas pesquisas sobre a tecnologia utilizada atualmente em relação aos painéis fotovoltaicos. A maioria absoluta dos módulos fotovoltaicos produzidos no mundo usa o silício como principal material.

As células do tipo monocristalinas de silício representam a primeira geração. O seu rendimento elétrico é relativamente elevado, sendo de aproximadamente 16%, podendo subir até cerca de 24% em laboratório, mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras. Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia na sua fabricação, devido à exigência de silício muito puro e com uma estrutura cristalina perfeita.

Já as células policristalinas têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia na sua purificação, mas apresentam um rendimento elétrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pelas imperfeições da estrutura cristalina.

As células de silício amorfo são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento é também o mais reduzido (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são películas muito finas aplicadas em uma base de material mais barato.

Outros materiais também são utilizados, entre eles, as tecnologias de CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio), GaAs (Arsenieto de Gálio) e células CdTe (Telureto de cádmio).

Do levantamento de informações realizado, observou-se que a tecnologia de módulos fotovoltaicos que mais se encaixam aos propósitos deste projeto é a que utiliza silício policristalino. Entre os fabricantes cotados estão a Solarex, a Kyocera e a Siemens (PORTAL DE ENERGIA, 2013).

Mesmo considerando esta pesquisa realizada em relação aos tipos de painéis fotovoltaicos comercializados atualmente, neste projeto não se buscou efetivamente somente a instalação de painéis fotovoltaicos de melhor qualidade e eficiência disponíveis no mercado quando da sua instalação. Isto se justifica, pois a Copel já possuía um pequeno conjunto de módulos fotovoltaicos provenientes de projetos anteriores de eletrificação que, por já estarem disponíveis no almoxarifado da empresa, foram utilizados também neste projeto.

Assim, foram montados e desenvolvidos dois sistemas, onde um deles é conectado diretamente à rede de distribuição da Copel, e um segundo sistema que fica conectado a algumas cargas isoladas da própria subestação. A soma dos sistemas conectado e isolado resulta em uma potência de 8 kWp, que tem uma área total de aproximadamente 56 m², considerando uma área útil de 0,9 m por módulo fotovoltaico. O estudo deste trabalho é focado justamente no sistema conectado a rede.

O sistema fotovoltaico conectado a rede é dividido em dois conjuntos de painéis fotovoltaicos, sendo o primeiro deles constituído de 30 módulos de 135W cada da marca kyocera, totalizando uma potência máxima de 4.050W. O segundo conjunto é formado por 20 módulos de 70W cada, da marca Mitsubishi, totalizando 1.400W de potência pico.

A tabela 07 apresenta as características 3 modelos de módulos fotovoltaicos. Os dados foram obtidos através de folhas de dados fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 7 – Eficiência dos Painéis Fotovoltaicos
Fonte: COPEL (2012)

Fabricante	Kyocera	Mitsubishi	Kyocera
Modelo	KD135SX-UPU	PV-UE125MF5N	KC 65T
Potência Máxima (W)	135	125	65
Área da placa (m ²)	1,002	1,007	0,489
Eficiência (%)	13,47	12,41	13,29
Custo unitário	R\$ 1.300,00	R\$ 1.299,00	R\$ 955,85
Potência desejada (kW)	6,6	6,6	6,6
Quantidade de painéis necessários	50	53	102
Área total (m ²)	50,10	53,37	49,878
Custo por Wp (R\$/W)	R\$ 9,63	R\$ 10,39	R\$ 14,71
Custo total	R\$ 65.000,00	R\$ 68.847,00	R\$ 97.496,70
Distribuidora	Solar Brasil	GoNature	BlueSol

A eficiência de cada modelo de painel é calculada pelos respectivos fabricantes usando-se as condições padrão de avaliação, isto é, irradiância de 1 kW/m², temperatura de 25 °C e massa de igual a 1,5.

A equação 03 é para se determinar a eficiência:

$$Eficiência(\%) = \frac{Potência\ Máxima\ da\ placa\ (W) * 100}{1000 \left(\frac{W}{m^2}\right) * Área\ da\ placa\ (m^2)} \quad Eq. 03$$

Verificando-se os dados da tabela 07, o módulo fotovoltaico que terá o melhor custo benefício é o KD135W-UPU da Kyocera. Sua potência máxima é superior aos modelos indicados na tabela 07.

Apresentam-se os motivos que indicam o painel KD135W-UPU como sendo o mais adequado para o projeto:

- Necessidade de menor quantidade de módulos para se obter a potência desejada;
- Menor área total, que causa impactos positivos na complexidade e custo da estrutura necessária para a instalação;
- Maior potência pelo menor custo unitário;
- Maior potência total pelo menor custo total;
- Menor custo (R\$/Wp).

Para acomodar todos estes módulos, existe uma estrutura metálica, responsável por suportar todos os módulos fotovoltaicos de forma fixa. As inclinações destes suportes devem ser de 24° para um maior desempenho.

4.1.2.2 Inversores Xantrex e CP Eletronica Utilizados

Como já foi destacado, o projeto desenvolvido é composto de dois sistemas fotovoltaicos, ambos conectados em paralelo com a rede da Copel.

O primeiro sistema possui uma potência instalada de 4050 Wp obtidos através de 30 módulos fotovoltaico da Kyocera de 135 W cada. Estes módulos estão arranjados em dois jogos de 15 módulos cada ligados em série, e os dois jogos ligados em paralelo.

O inversor deste primeiro sistema é um Xantrex GT4.0-NA-240/208 que a Copel já possuía e optou por reaproveitar neste projeto. Ele possui potência de 4 kW, com tensão de

saída de 220 V. O rendimento está na faixa de 95,5%. A faixa de tensão para corrente contínua de entrada situa-se entre 195 V a 550 V.

O segundo inversor é um modelo da CP Eletrônica. Trata-se do CP1000 fornecido a título de pesquisa e desenvolvimento pelo próprio fabricante. Possui potência de 1,1 kW, com tensão de saída de 220 V. O rendimento está na faixa de 92%. A faixa de tensão de entrada situa-se entre 160 V e 300 V. Possui isolamento galvânica entre a instalação dos painéis e a rede elétrica através de transformador isolador e proteção anti-ilhamento. Além disso, conta com interface de comunicação para configuração e leitura de dados.

A título de outro estudo e avaliação da Copel, instalado junto à estes dois sistemas que são objetos deste estudo, existe um terceiro sistema fotovoltaico implantado. A grande diferença básica deste terceiro sistema, é que ele se trata de um sistema fotovoltaico isolado, ou seja, ele não fica conectado de forma permanente à rede da concessionária, mas sim, a apenas uma carga fixa da própria subestação. Este sistema fotovoltaico isolado não será objeto de estudo neste trabalho.

A figura 9 representa os três sistemas citados, onde destaca-se os dois circuitos aqui estudados, através do acoplamento dos inversores Xantrex e CP Eletrônica.

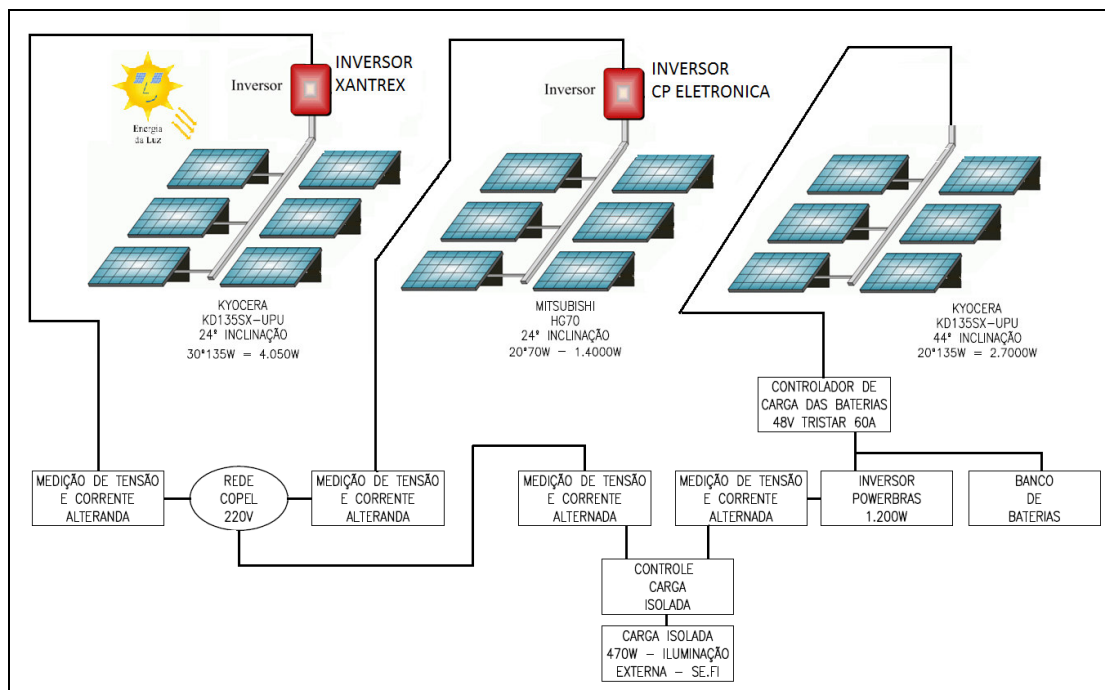


Figura 9 – Detalhe geral das Instalações dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede e Isolado.
Fonte: Projeto Piloto COPEL – Sistema Fotovoltaico

4.1.3 Resultados Operacionais dos Sistemas

4.1.3.1 Medições de qualidade de energia

Toda a instalação física comportou a operação dos sistemas. As estruturas metálicas confeccionadas apresentaram ótima qualidade, conforme especificado em projeto. O cabeamento instalado foi sobre dimensionado de forma a obter-se uma queda de tensão menor ao longo da linha, devido a sua menor resistência.

As caixas de conexão foram devidamente instaladas, respeitando o grau de proteção exigido, inclusive na caixa que comporta a placa eletrônica de medição das grandezas externas (termômetro e piranômetro).

Os equipamentos foram devidamente fixados em área própria e operam nas condições especificadas pelos fabricantes, principalmente na questão de ventilação para resfriamento.

Quanto aos inversores, os resultados obtidos com a operação do Inversor Xantrex estão de acordo com o objetivo do inversor. Entre os dois inversores conectados à rede, é o que apresenta o melhor rendimento.

Nesta etapa do presente trabalho é detalhada a operação dos inversores conectados à rede de distribuição, com os resultados das medições de qualidade de energia.

Para tal análise, foram realizadas medições utilizando o medidor e registrador de eventos MARH-21 - 993, da RMS Sistemas Eletrônicos, empresa nacional, situada em Porto Alegre – RS, o qual efetua 64 a 192 amostras por ciclo, conforme programação. Para os dados de irradiância solar, foi utilizado um Piranômetro, marca Kimo, modelo CR100.

Do dia 12/10/2012 até 26/10/2012 foram realizadas diversas medições de qualidade de energia, gráfico 1, é possível verificar o perfil da irradiância solar para o período descrito. Baseado neste perfil da irradiância solar é que foram definidos os dias a serem analisados, a fim de permitir interpretar como é o comportamento dos inversores nos diferentes dias de intensidade da irradiância solar. Observa-se, particularmente nos dias 15 e 18, que possuem uma curva de irradiação mais consistente, que o valor máximo de irradiância atingido foi acima de 1000W/m^2 , o que representa um valor alto para a cidade de Curitiba nesta época em

que foram realizadas as leituras. Estes valores podem ser justificados pela falta de calibração do piranômetro marca Kimo, modelo CR100 ou devido a sua baixa qualidade.

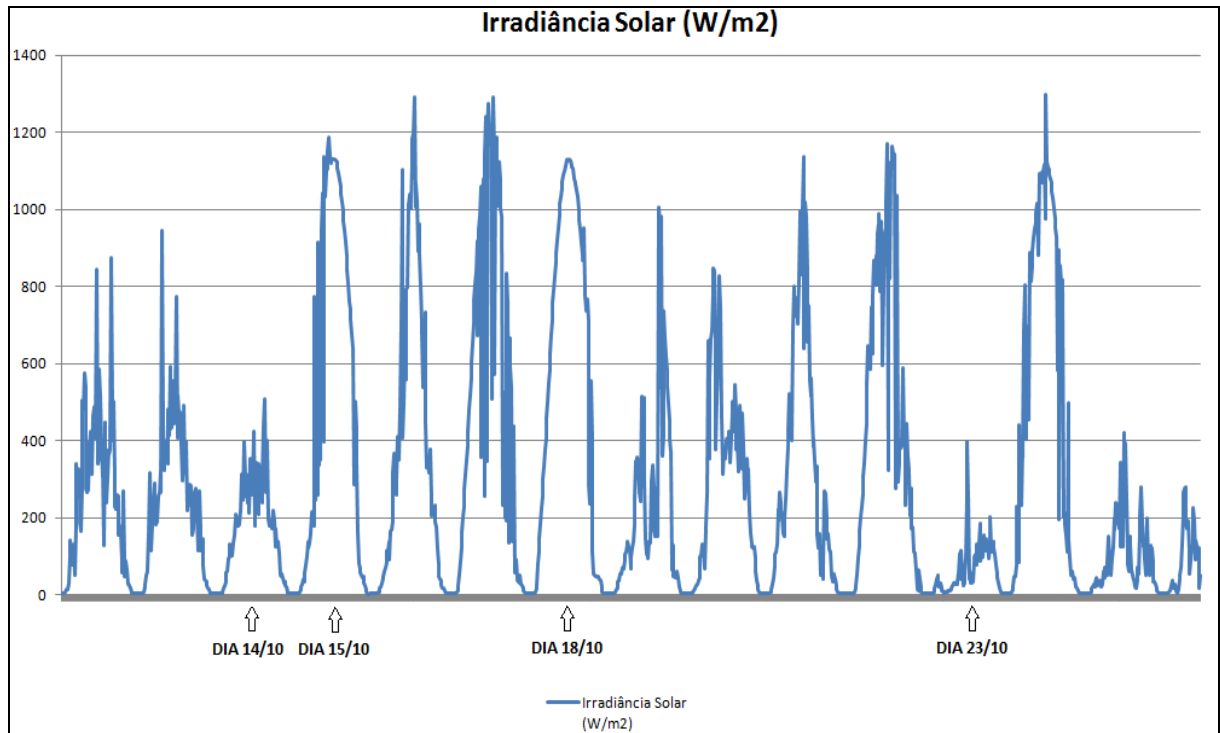


Gráfico 1 - Curva de Irradiância Solar entre os dias 12/10/2012 e 26/12/2012

4.1.3.2 Medições de qualidade de energia inversor Xantrex

O método de análise utilizado foi o de comparação de diversas grandezas medidas como a irradiância solar, na saída do inversor, tensão fornecida pelo inversor, distorção harmônica total de tensão e de corrente. Baseado no gráfico 1 de irradiância solar, buscou-se destacar e analisar, os dias de maior irradiância, no caso os dias 15 e 18 e também os dias de menor irradiância do período verificado, que foram os dias 14 e 23.

Conforme citado anteriormente, o inversor Xantrex possui capacidade de 4000W, e o painel fotovoltaico que o alimenta tem a potência de 4050Wp, com sobredimensionamento de 1,25%.

Destacando inicialmente o dia 14/10 na curva de irradianças do gráfico 1, tem-se um dia tipicamente com baixa irradiância solar. Ao detalhar este dia de irradiância juntamente

com o perfil de tensão do gráfico 2, percebe-se um leve acréscimo da tensão no momento em que há uma pequena incidência solar, mas como a geração é bastante intermitente, esta oscilação na tensão pode ser também reflexo da própria oscilação natural da tensão da rede da concessionária.

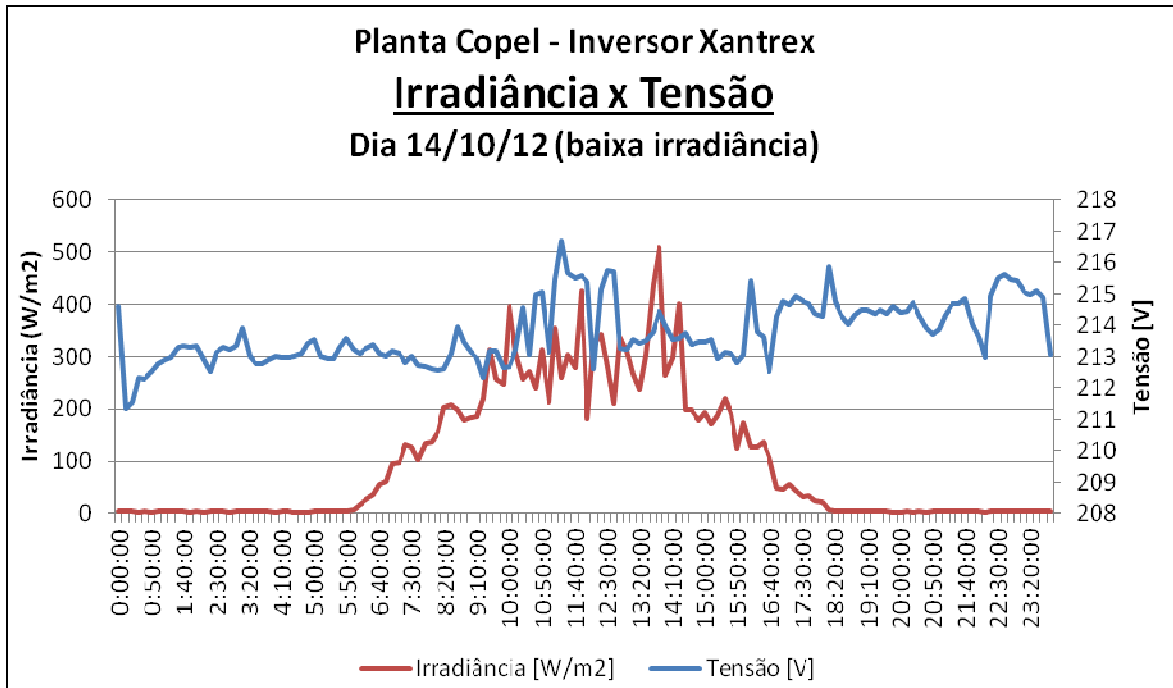


Gráfico 2 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 14/10/2012

No gráfico 3, tem-se a curva de THD de tensão sobreposta com a curva de potência injetada na rede pelo inversor para o dia 14/10. Percebe-se uma pequena correlação no aumento da THD de tensão quando se tem um aumento na potência injetada. Como o inversor está trabalhando com menos de 30% da sua potência nominal, as distorções por ele impostas acabam sendo mais consideráveis que na condição de trabalho em potência máxima, e assim, comprova-se mais uma vez que nestas condições qualquer conclusão deve ser melhor apurada.

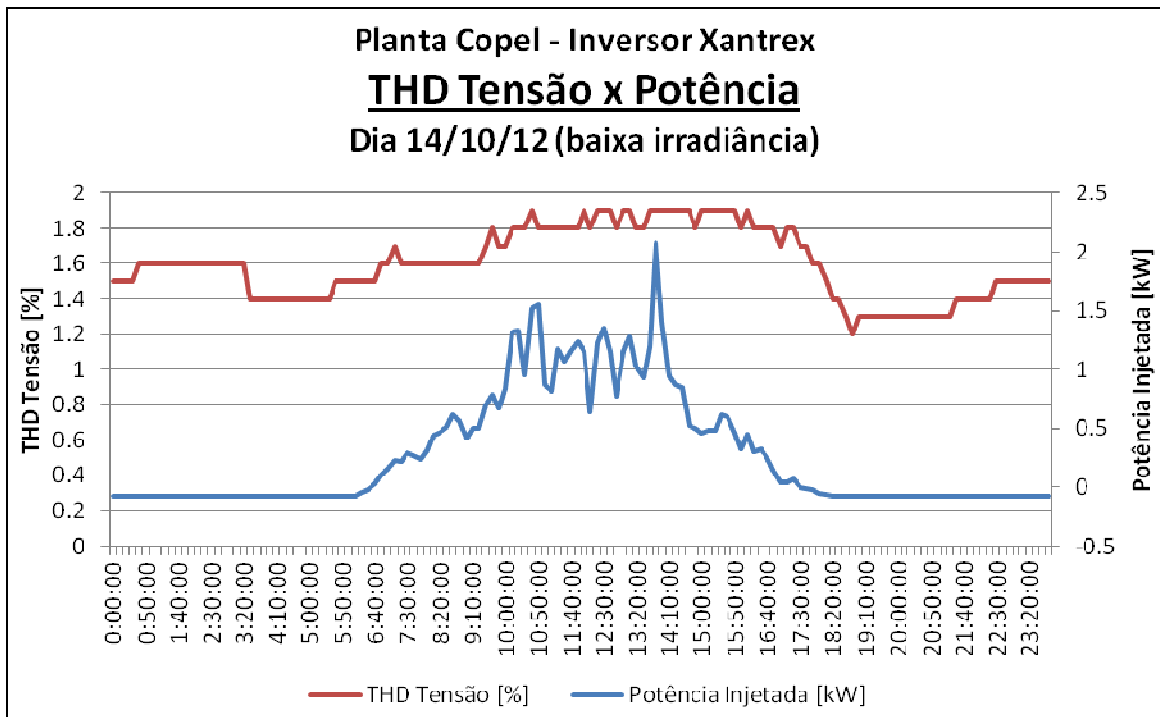


Gráfico 3 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 14/10/2012

Finalizando a análise das grandezas para o dia 14/10, apresenta-se o gráfico 4, intercalando as curvas de distorção harmônica de tensão, corrente e potência injetada ao longo de todo o dia. O que pode-se destacar neste gráfico é a curva de distorção total de harmônica de corrente. Nos períodos onde o inversor não está injetando potência, ou seja, nos períodos sem irradiância solar, o percentual de THDi é bastante elevado, e com a entrada do inversor em operação, esta distorção cai drasticamente para valores mais aceitáveis. Pode-se dizer que uma razão para este acontecimento se deve aos pequenos valores de corrente (ruídos, interferências e/ou induções) que são captados e registrados pelo medidor de qualidade nestes períodos, onde um grande percentual desta baixa corrente, tem no seu espectro componentes que são diferentes da fundamental, e assim, elevam no período noturno o percentual de THDi para os valores vistos no gráfico.

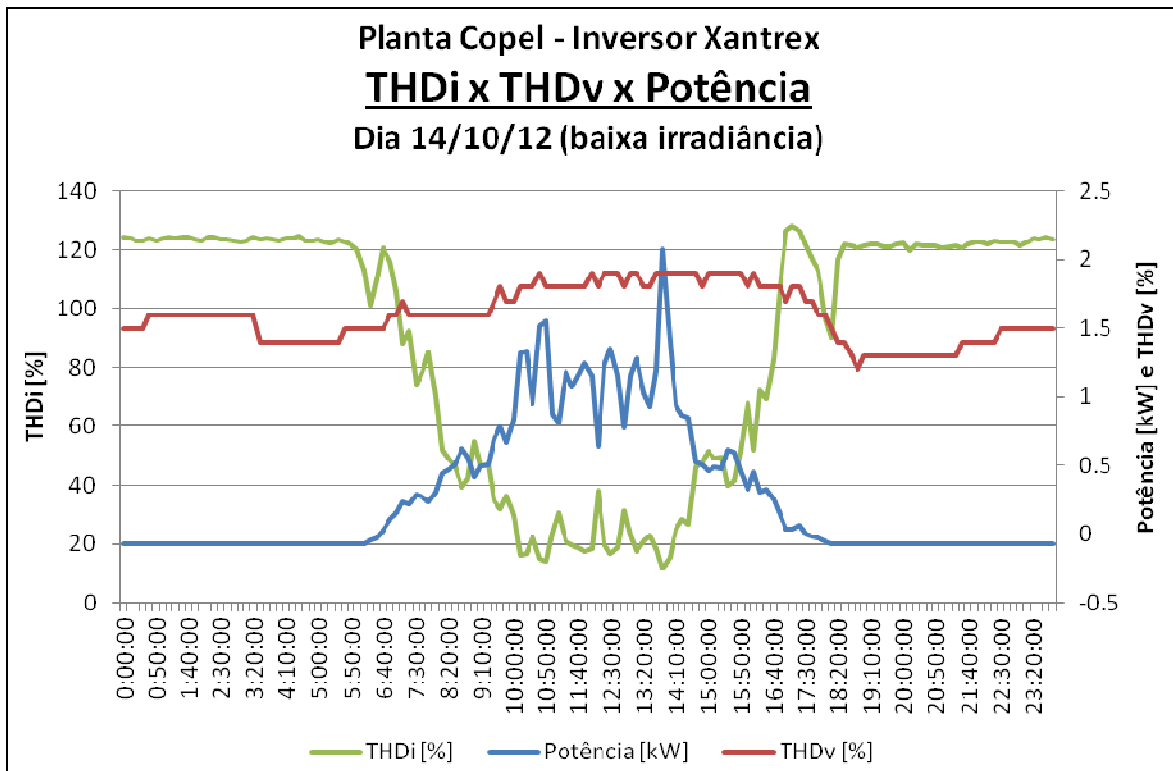


Gráfico 4 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 14/10/2012

Continuando a análise para este inversor, seguiu-se para o segundo dia de baixa irradiância escolhido. De forma similar que nas análises anteriores feitas para o dia 14 de baixa irradiância, vê-se no gráfico 5, a curva de irradiância e tensão para o dia 23/10, apresentando uma grande volatilidade tanto da tensão quanto da irradiância.

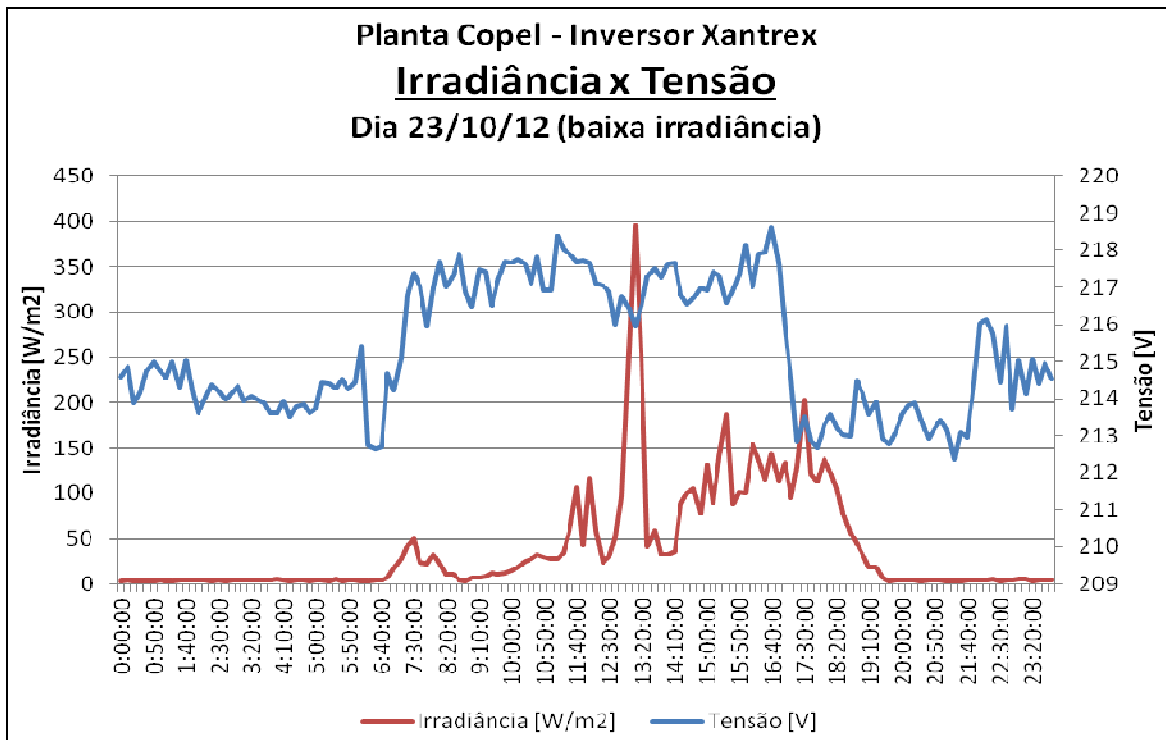


Gráfico 5 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 23/10/2012

Para os gráficos 6 e 7, tanto as distorções harmônicas de tensão quanto as de corrente, ficam seriamente comprometidas de uma análise mais perfeita, pois pode-se perceber que para um dia de baixa injeção de energia na rede como este, as medições de qualidade ficam afetadas pela própria distorção que o inversor causa. Isto posto, e conforme verificado em Urbanetz, 2010, quando o inversor trabalha com percentual baixo em relação à sua potência nominal, os níveis de THD de tensão e principalmente de corrente, juntamente com a presença de outras cargas na rede, deformam a corrente injetada pelo inversor.

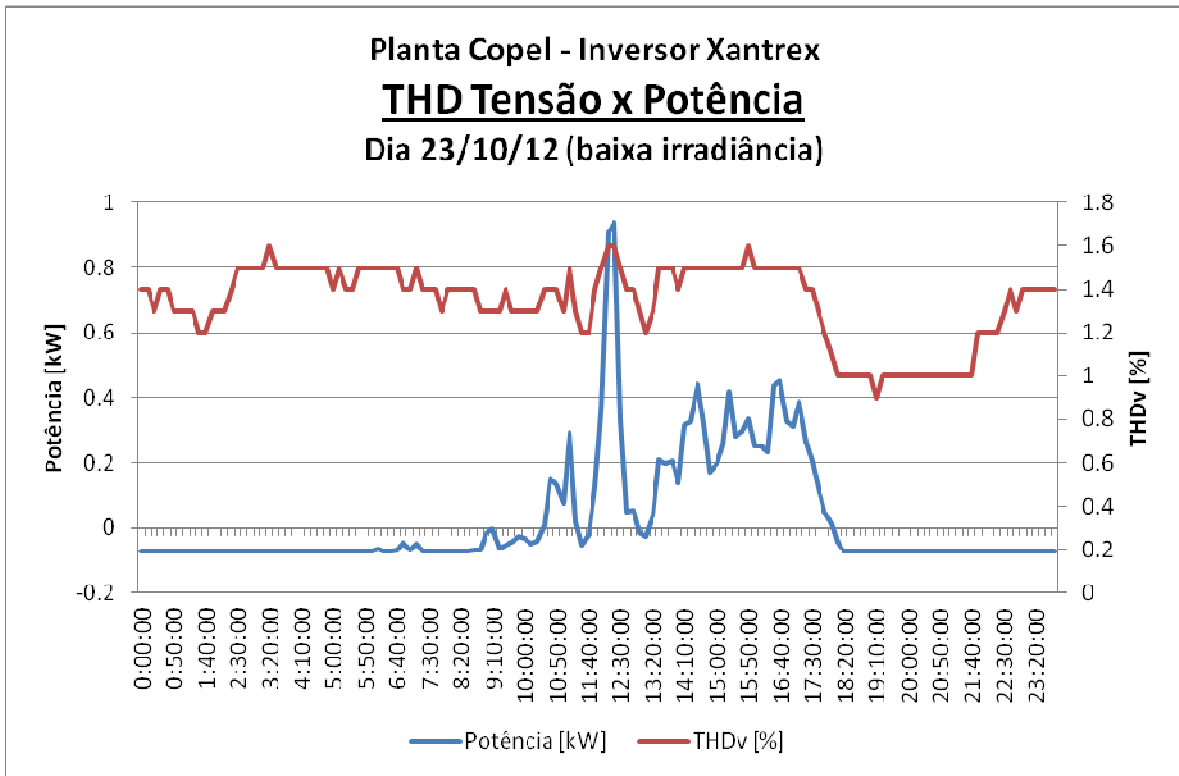


Gráfico 6 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 23/10/2012

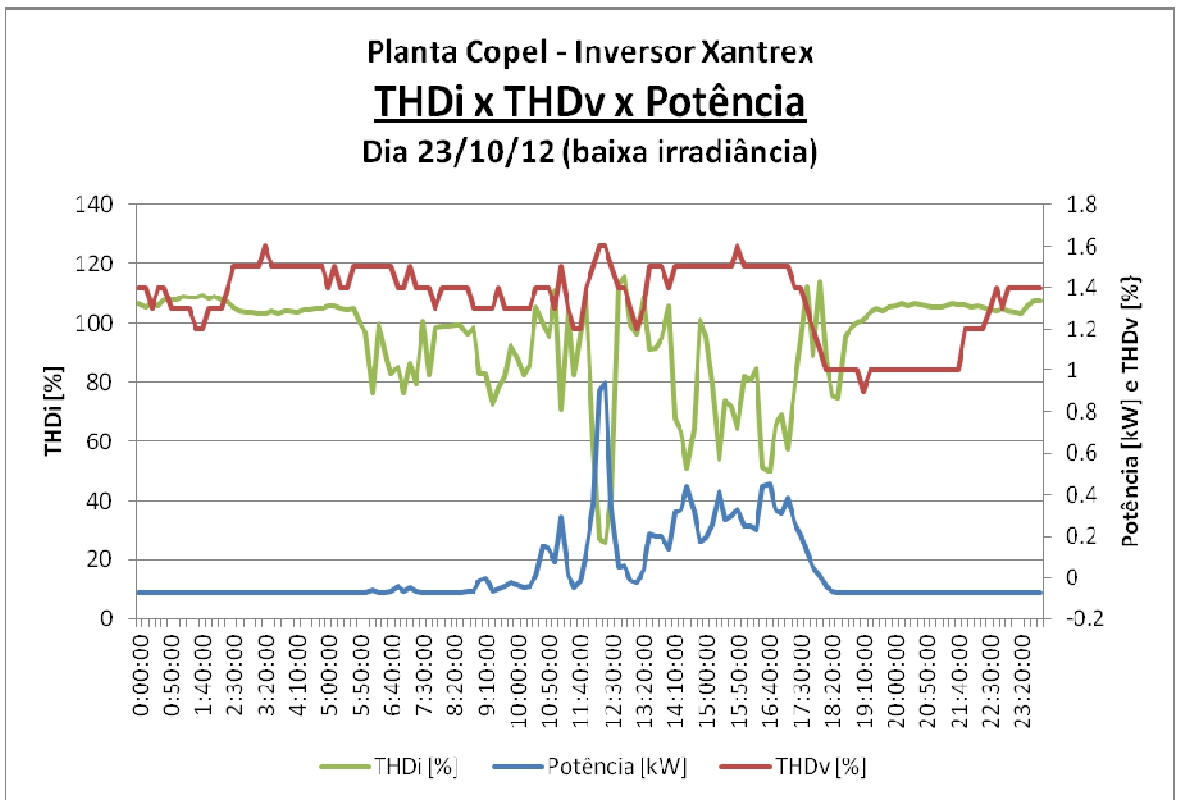


Gráfico 7 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 23/10/2012

Destacam-se as análises dos dois dias identificados com maior irradiância da série levantada. Tanto para o dia 15 quanto para o dia 18/10, identificou-se irradiância acima de 1000 W/m^2 e com um perfil bem próximo do ideal, com energia gerada iniciando a partir das 6 horas da manhã, atingindo a sua potência máxima por volta das 12 horas, e diminuindo gradativamente em seguida. Conforme comentado anteriormente, este valor de irradiância encontrado é um pouco superior ao esperado para esta época do ano, dessa forma, acredita-se que este valor é justificado pela falta de calibração ou baixa qualidade do piranômetro utilizado.

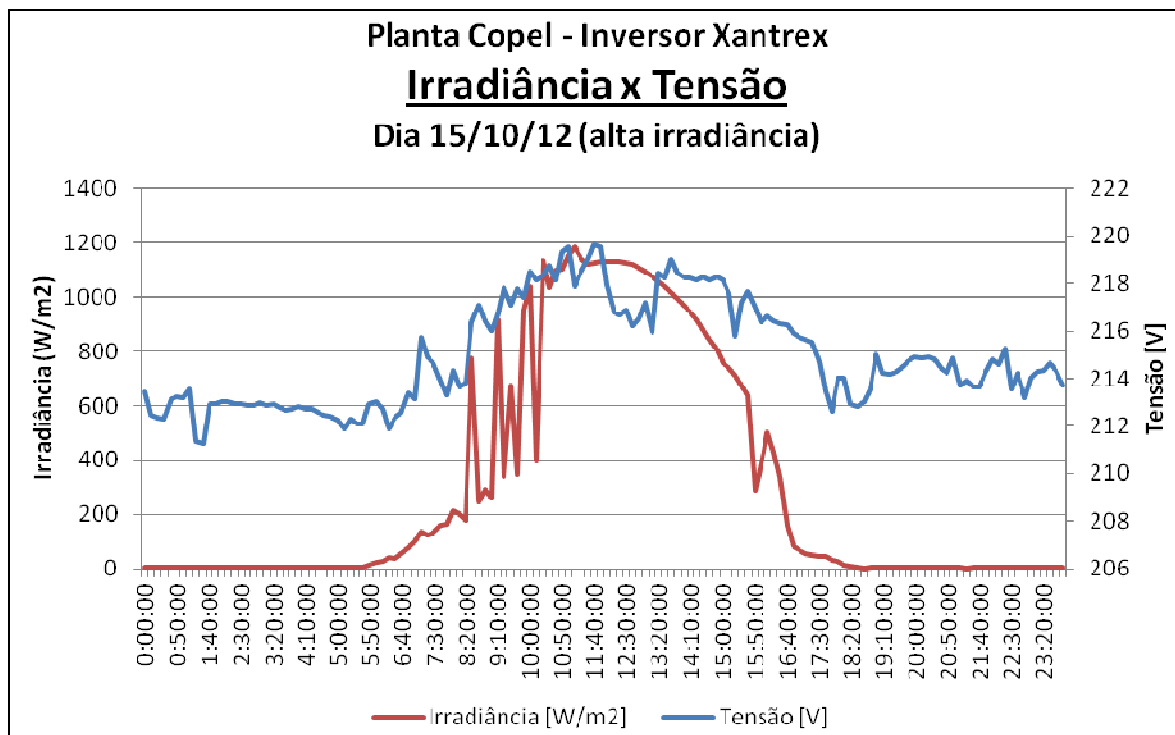


Gráfico 8 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 15/10/2012

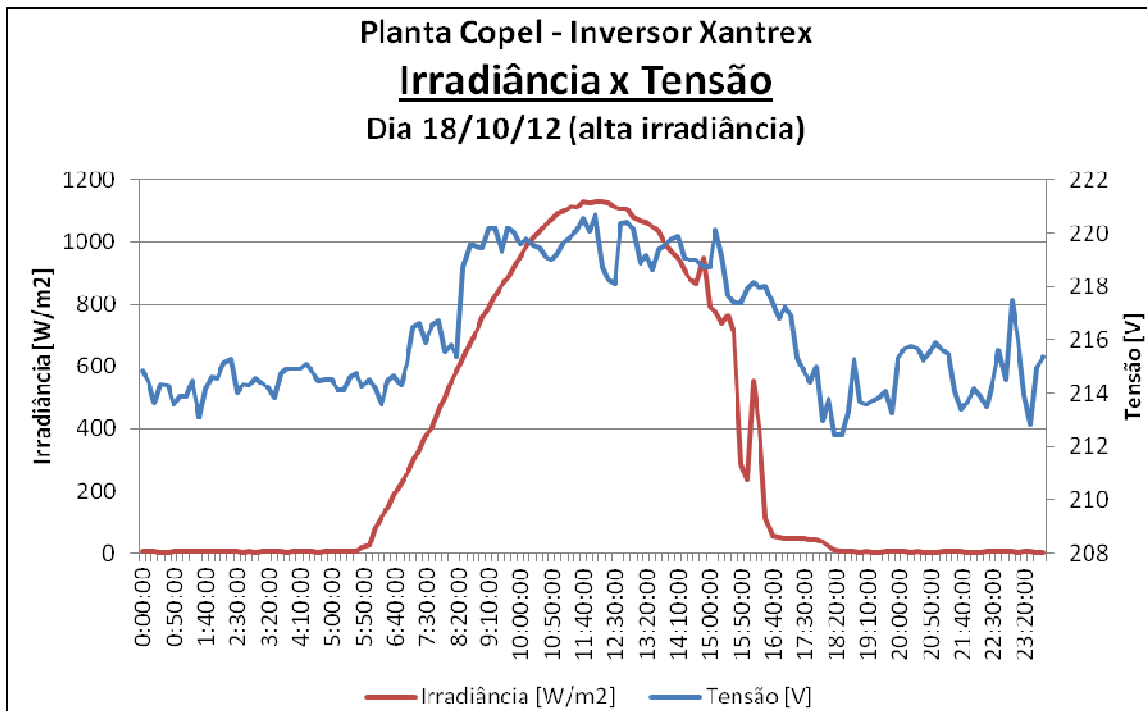


Gráfico 9 - Curvas de Irradiância e Tensão no dia 18/10/2012

Diferentemente das análises efetuadas para os dias com baixa e inconstante geração de energia, nos gráficos 8 e 9, tem-se o exemplo de alta irradiância solar. Pode-se verificar a existência de um acréscimo sobre a tensão nos momentos de maior irradiância, momento este com o inversor conectado. Entre as 08:00 e as 18:00 do dia 18/10/2012 é possível observar o acréscimo de 6V, 215V para 221V. Para o dia 15, o acréscimo chega a ser ainda maior, de até 7V. No dia de baixa irradiância é mais difícil analisar porque o inversor por algumas vezes se desconecta e volta a se conectar. A conclusão sobre o ganho de tensão durante o período de conexão do Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede é similar ao identificado em Urbanetz, 2010.

Analisando o gráfico 10, percebe-se um THD máximo de tensão de 2%, valor bem abaixo do limite de 10% estipulado em Norma (ANEEL, 2012). Outro dado importante que se destaca é o leve incremento desta distorção harmônica de tensão quando da entrada do inversor. Este leve aumento pode ser atribuído ao fato da forma de onda da tensão já estar em uma condição muito boa, e o gerador fotovoltaico passa a contribuir com uma corrente no ponto de conexão que altera essa condição quase ideal da tensão sob o ponto de vista da THD de tensão (URBANETZ, 2010).

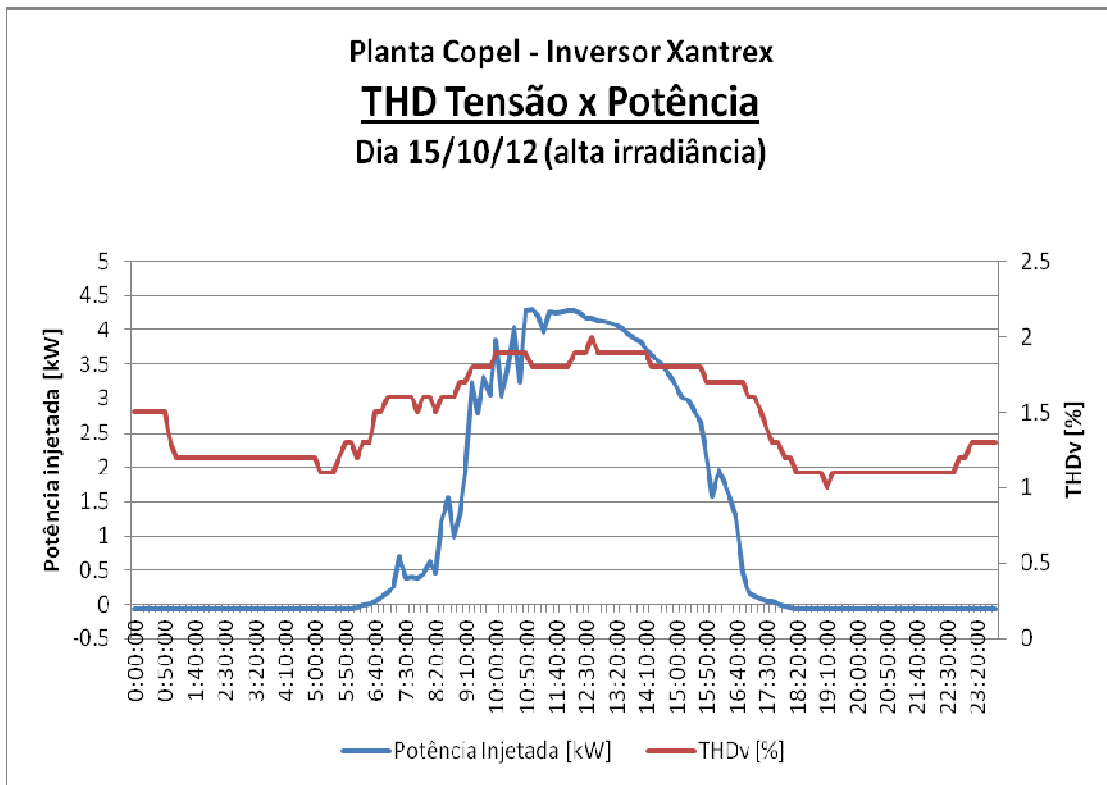


Gráfico 10 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 15/10/2012

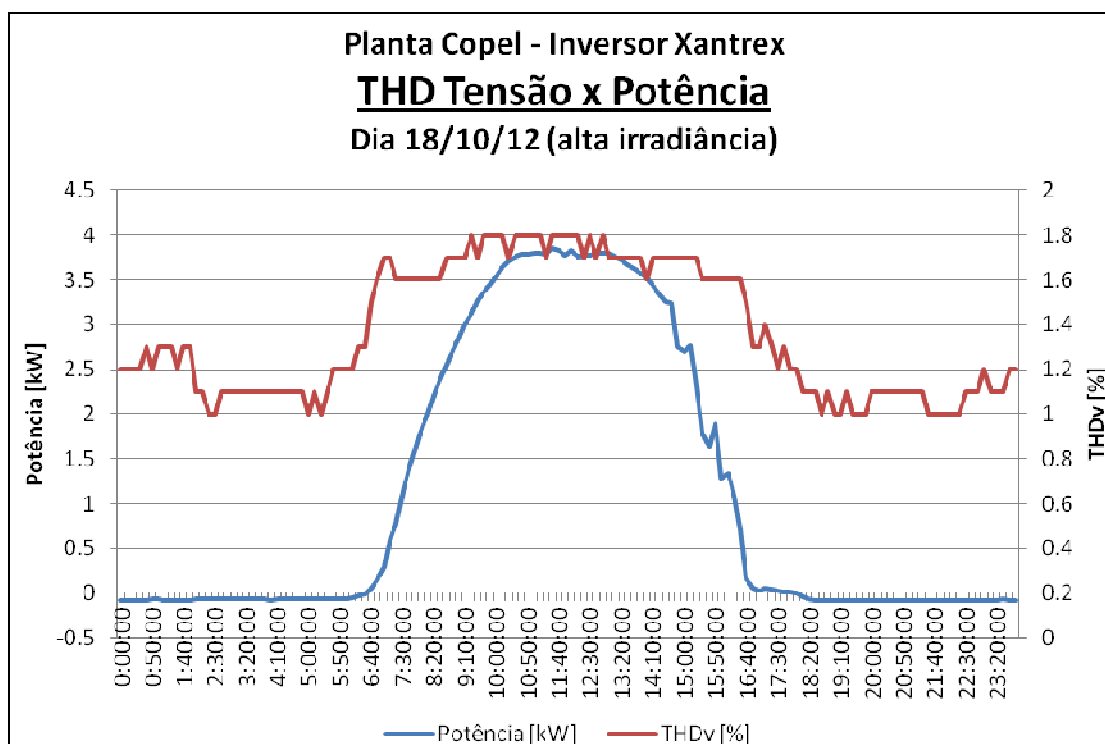


Gráfico 11 - Curvas de THD de Tensão e Potência no dia 18/10/2012

Este acréscimo na THD de tensão é bem visível no dia 18/10, figura 11, onde se tem o aumento partindo de um THDv de 1,2% à um máximo de 1,8%. 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 (URBANETZ, 2010). Nos gráficos 12 e 13 respectivamente, a senóide de tensão e corrente e as componentes harmônicas da tensão na saída do inversor SB2500 do Centro de Eventos da UFSC, medições estas apresentadas em Urbanetz, 2010, as quais corroboram com as medições analisadas.

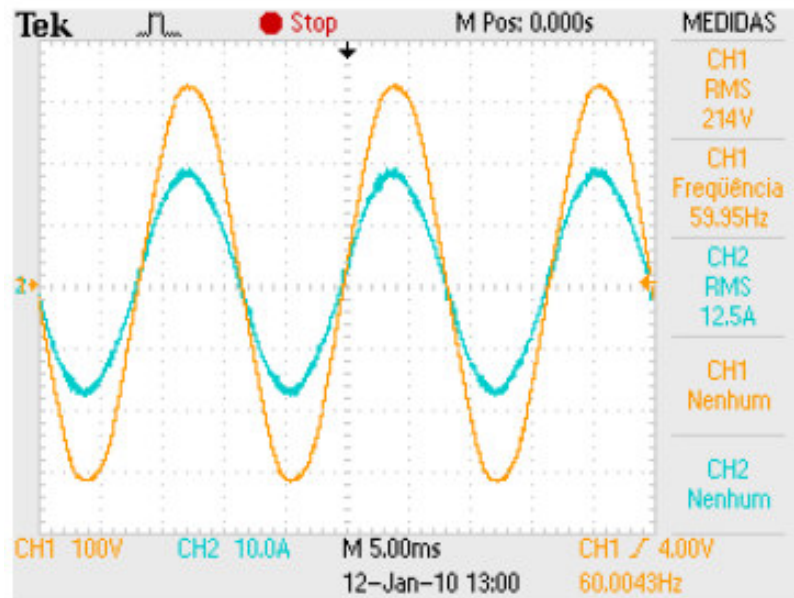


Gráfico 12 - Tensão e corrente na saída do inversor SB2500
Fonte: Centro de Eventos da UFSC (URBANETZ, 2010).

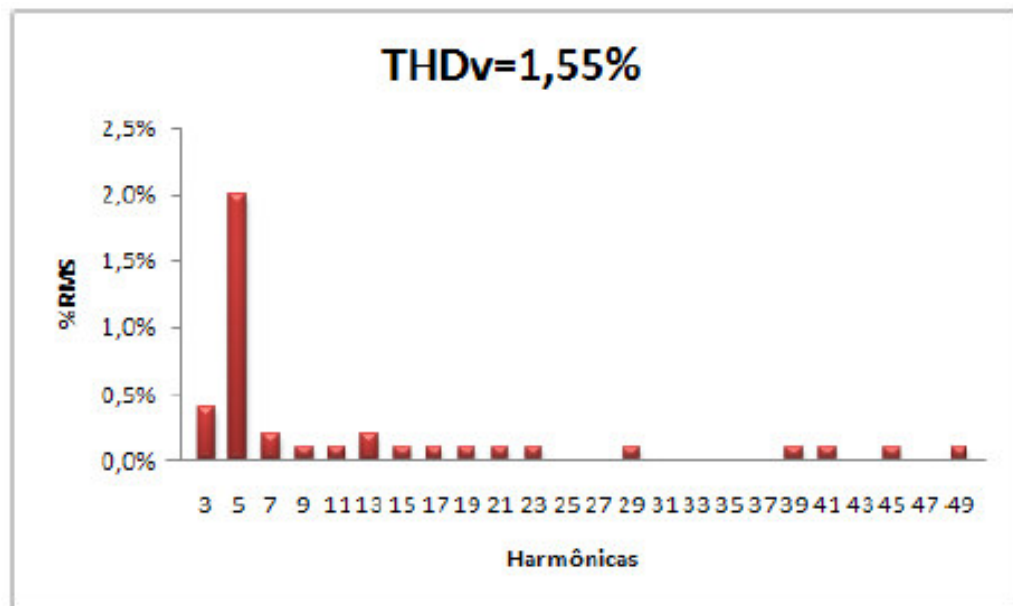


Gráfico 13 - Componentes Harmônicos de Tensão no ponto de conexão na fase C
Fonte: Centro de Eventos da UFSC (URBANETZ, 2012).

Observando os gráficos 14 e 15, com as curvas de THD de tensão e corrente sobrepostas, percebe-se uma drástica queda da THDi quando da entrada do inversor. Como neste estudo não se realizou as medições dos conteúdos harmônicos sem a conexão do inversor à rede, fica difícil de precisar com exatidão a origem dessa elevada distorção harmônica, pois se faz necessário avaliar a THD de corrente da carga.

Mesmo quando se avalia na situação de potência máxima injetada, entre às 10:00h e às 14:00h, percebe-se que o conteúdo harmônico da corrente não fica abaixo de 7%, ou seja, bem acima do limite máximo permitido de 5% recomendado pela ABNT NBR 16149, o que caracteriza a presença de cargas não lineares no circuito elétrico do ponto de conexão, fato este observado em Urbanetz, 2010.

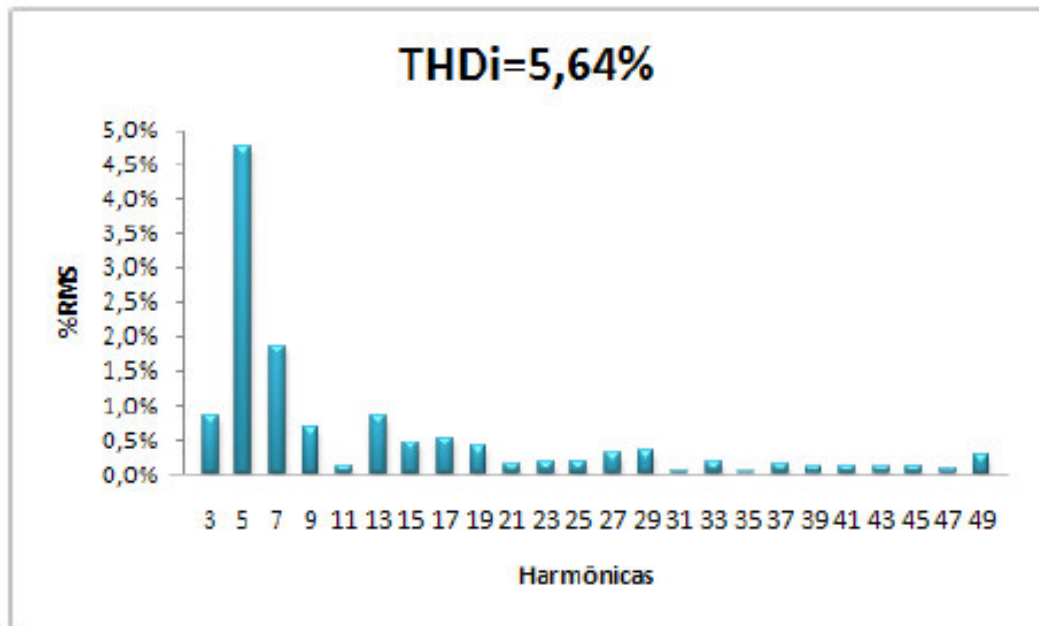


Gráfico 14 - Componentes harmônicos da corrente na saída do inversor
Fonte: Pedra Branca (URBANETZ, 2010).

No gráfico 14 visualiza-se o espectro de harmônicas de corrente do inversor SMC6000A do Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede de 6,4 kWp do Condomínio Pedra Branca, também acima do limite de THDi de 5% (URBANETZ, 2010).

No gráfico 15, como também no 16, é possível notar que por volta das 06:30 e 07:00h da manhã, um período de forte volatilidade no perfil da THDi. Isto pode ser explicado pelo início de injeção de potência do inversor na rede, momento este que conforme já foi citado, apresenta forte aparecimento de THDi e de um leve incremento na THDv.

Em relação à THDi, pode-se novamente destacar também, as elevadas taxas de distorção presentes nos períodos sem injeção de potência pelo inversor, o que pode ser caracterizado por interferências nos registros de corrente para este período onde o valor da corrente é quase zero, elevando assim, o percentual de THDi.

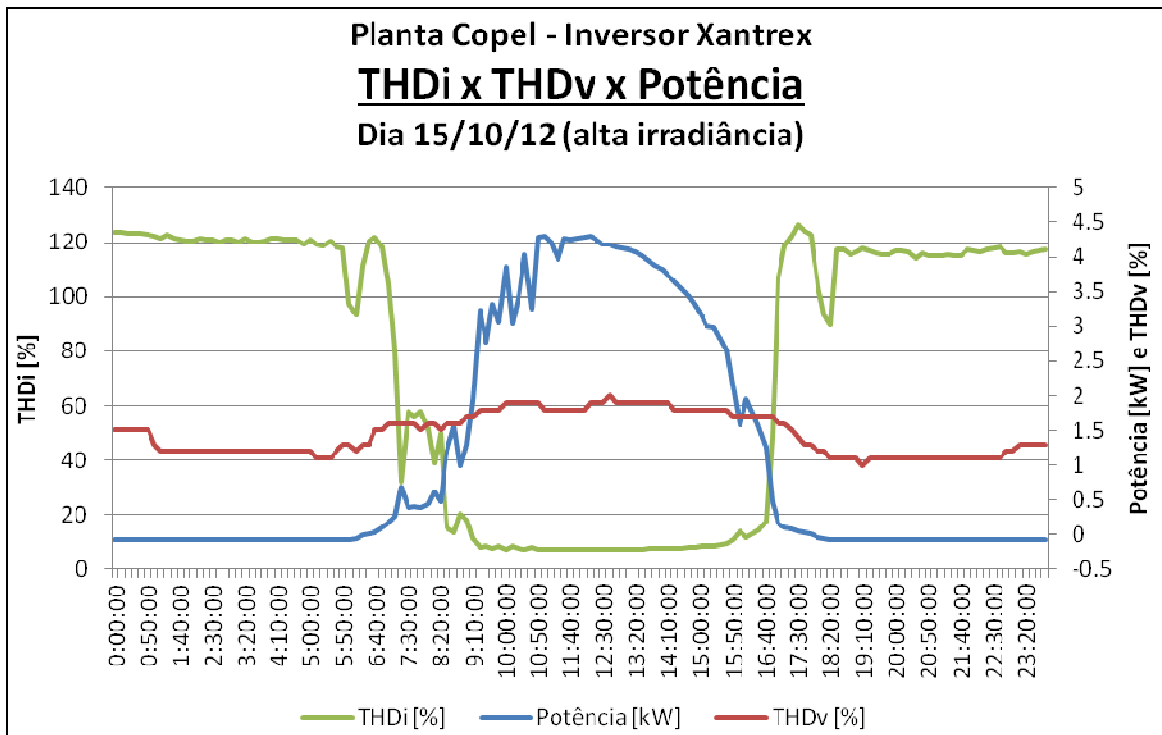


Gráfico 15 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 15/10/2012

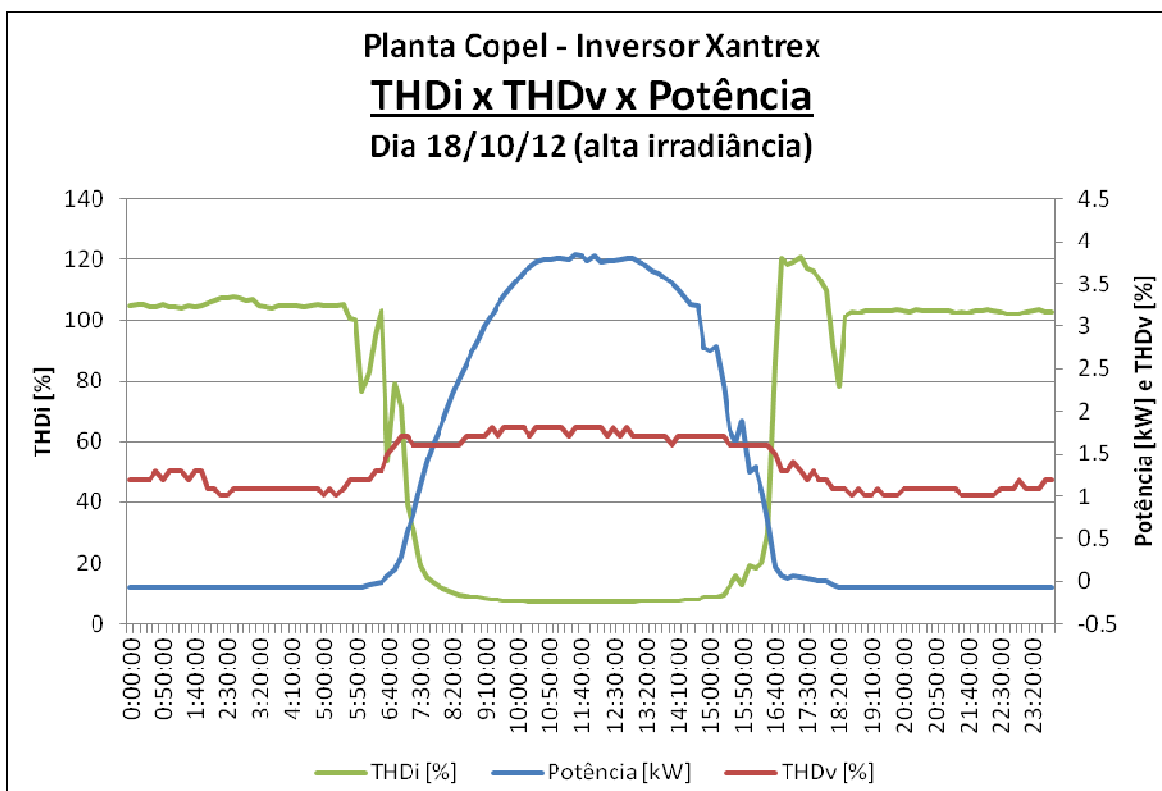


Gráfico 16 - Curvas de THDv, THDi e Potência no dia 18/10/2012

Outro exemplo é do Sistema Fotovoltaico conectado à rede da Fundação Estrela (URBANETZ, 2010). Pode-se notar nos gráficos 15 e 16 que a THDv é relativamente baixa e bem próxima dos valores apresentados nos gráficos 17 e 18, em torno de 2 %. Da mesma forma, as THDi também são parecidas e com índices bastante elevado em ambos os casos, demonstrando que o elevado conteúdo harmônico da corrente é devido à presença de muitas cargas não lineares. Como o conteúdo harmônico da tensão é baixo, pode-se dizer que 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 inversor à rede, porém, o formato da corrente, e, conseqüentemente, seu elevado conteúdo harmônico, servem de atenção para possíveis problemas na conexão.

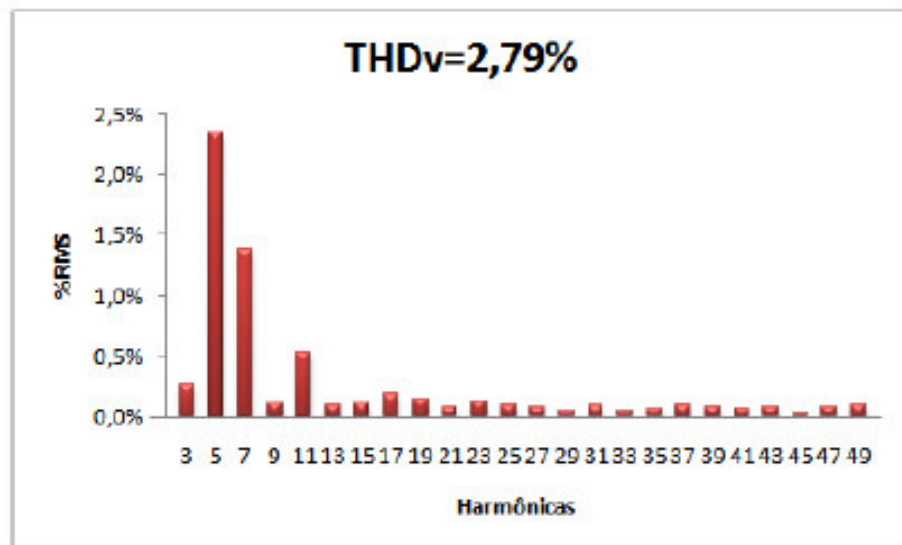


Gráfico 17 - Componentes harmônicos da tensão VAB no quadro elétrico
Fonte: Fundação Estrela (URBANETZ, 2010).

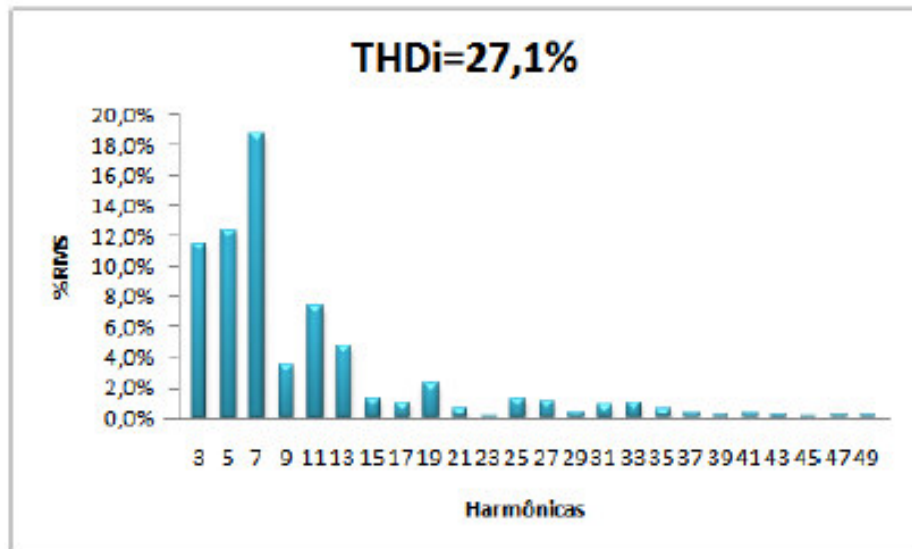


Gráfico 18 - Componentes harmônicos da corrente IA no quadro elétrico 1
Fonte: Fundação Estrela (URBANETZ, 2010).

No gráfico 19, é possível identificar as formas de onda da tensão de linha e da corrente de uma fase para o quadro citado da Fundação Estrela (URBANETZ, 2010)

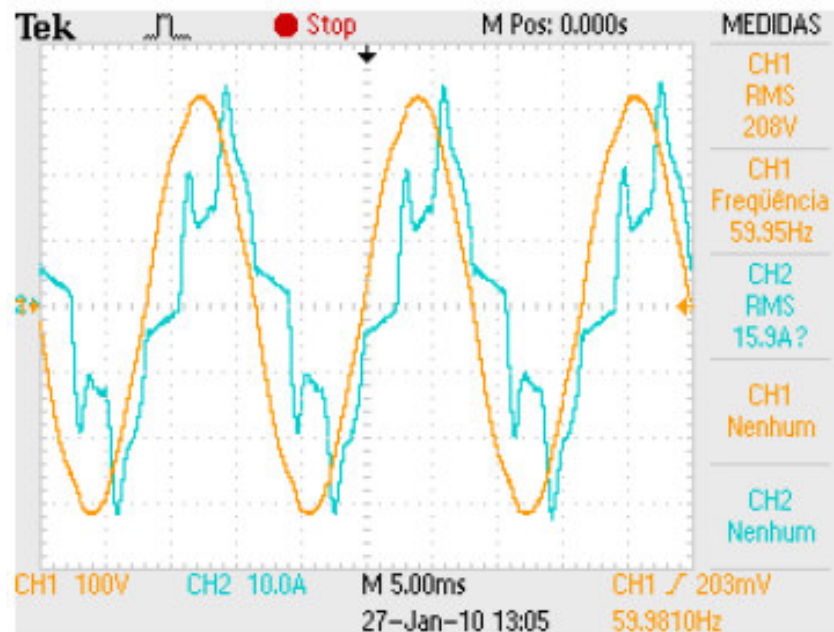


Gráfico 19 - Tensão VAB e corrente IA medidos no quadro elétrico 1
Fonte: Fundação Estrela (URBANETZ, 2010).

4.1.3.3 Medições de qualidade de energia Inversor CP Eletrônica

O inversor CP possui capacidade de 1000W, e o painel fotovoltaico que o alimenta tem a potência de 1400Wp, com sobre dimensionamento de 40%.

Conforme se comentou anteriormente, o inversor utilizado na planta experimental da Copel trata-se de um modelo em desenvolvimento, o qual foi fornecido à Copel para fins de ensaios e testes de desempenho em relação à sua qualidade, performance e segurança quando conectado em paralelismo permanente com a rede.

Dessa forma, com o intuito de não mascarar os dados coletados e conseqüentemente as conclusões em relação a este importante assunto, optou-se por não analisar os dados de qualidade de energia efetuados na saída deste inversor.

4.1.3.4 Medições de qualidade de energia dos inversores em paralelo

Conforme colocado no item anterior, a análise do inversor da marca CP Eletrônica não foi abordado de forma isolada neste trabalho por entender-se que como se trata de um inversor em desenvolvimento, o seu estudo poderia mascarar os resultados finais deste trabalho. Já para uma análise em conjunto com o inversor Xantrex, em um ponto do Barramento Geral onde ambos estão conectados, entende-se que as análises, mesmo que um pouco mais superficiais, podem ser consideradas para o estudo como um todo, de maneira que venha em algum sentido subsidiar as conclusões finais deste trabalho.

Durante a campanha de medição realizaram-se vários testes com os inversores ligados em paralelo. A fim de medir o real impacto de duas tecnologias diferentes de equipamentos, os mesmos foram ligados nas mesmas fases, 220V_{CA} monofásico, da linha de distribuição de baixa tensão.

O objetivo foi averiguar as principais características da energia inserida na rede, bem como a operação dos equipamentos. O comportamento de algumas grandezas elétricas são apresentados entre os gráficos 20 e 24.

O intuito de apresentar estes gráficos é mais como uma forma de complementar os dados e análises efetuados anteriormente, pois como já foi citado, realizar uma análise de grandezas como Fator de Potência ou das Potências Ativa, Reativa e Aparente, sem realmente conhecer a carga em que se está ligado o inversor, não leva a resultados conclusivos.

Nos gráficos, 20 e 21, vê-se o comportamento dos níveis de potência injetada e corrente respectivamente, no ponto chamado de Barramento Geral em relação à irradiância Solar presente no momento da medição. Pode-se observar uma forte correlação da potência gerada em função da irradiância solar recebida.

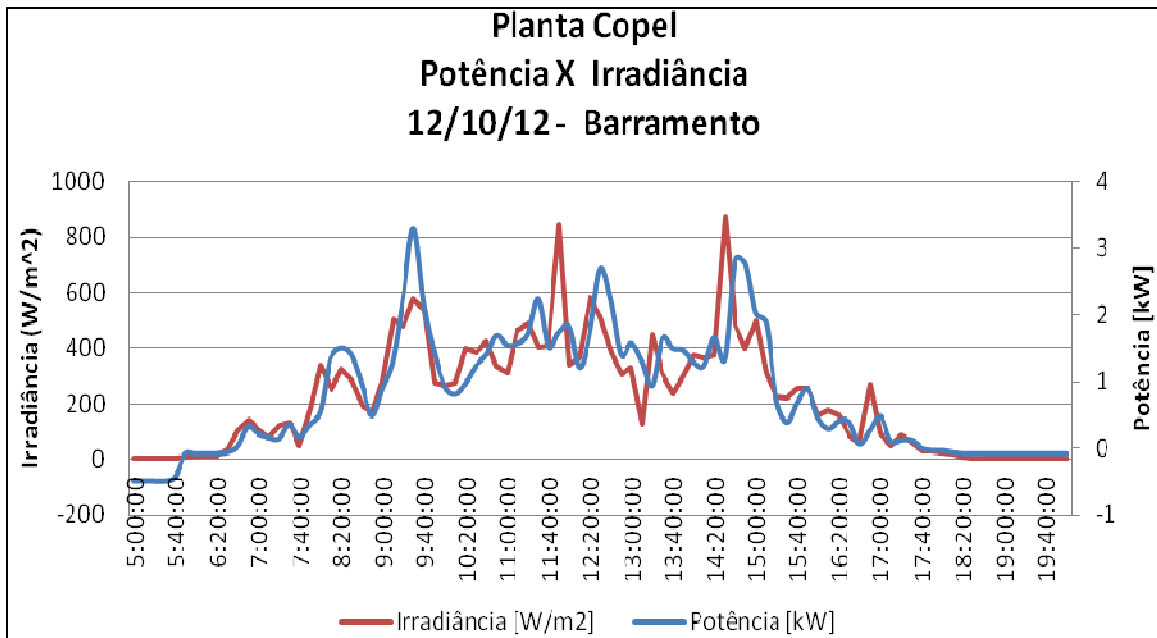


Gráfico 20 – Potência e Irradiância no Barramento Geral

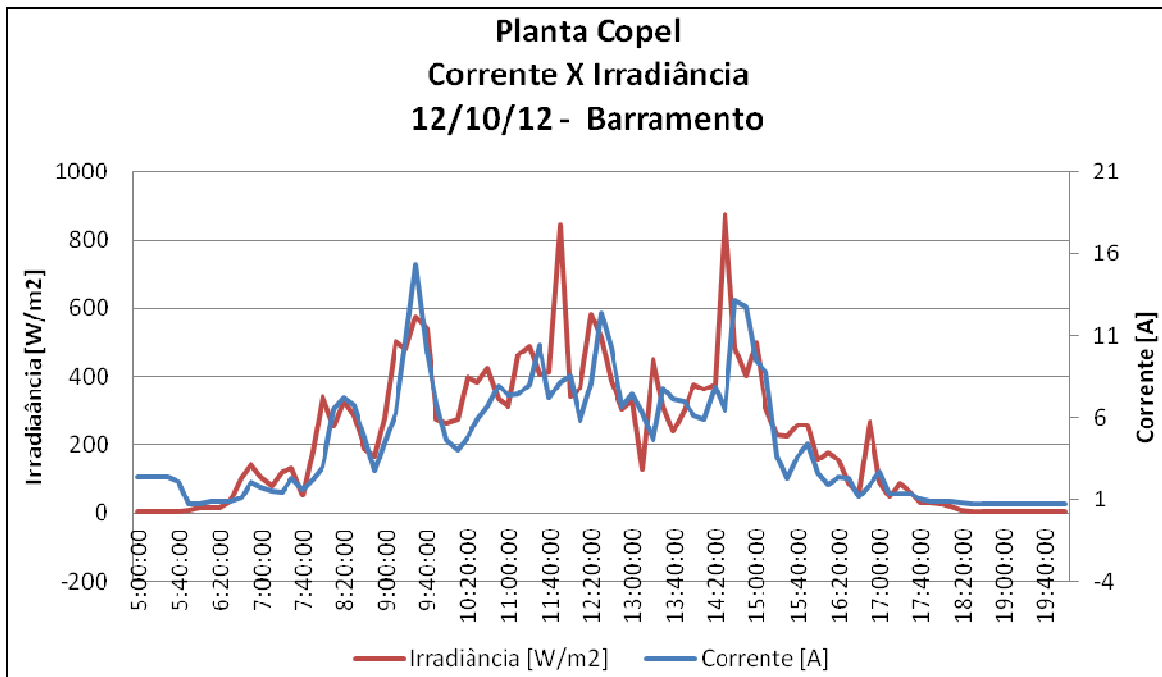


Gráfico 21 – Corrente e Irradiância no Barramento Geral

A tensão, conforme já analisada nas condições anteriores, aqui também apresentou uma correlação muito forte com a irradiância solar recebida, visto no gráfico 22.

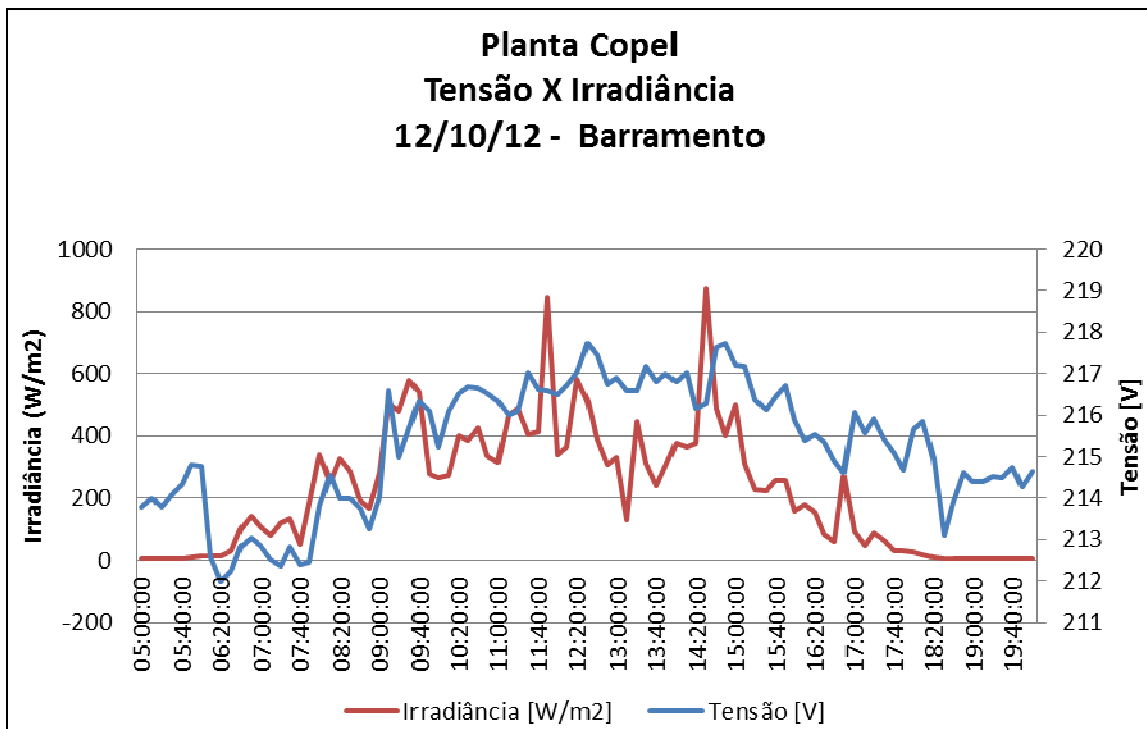


Gráfico 22 – Tensão da rede e Irradiância no Barramento Geral

No gráfico 23, veem-se sobrepostas as Potências Ativa, Reativa e Aparente. É possível perceber claramente a estabilidade que o sistema produz em relação ao fator de potência.

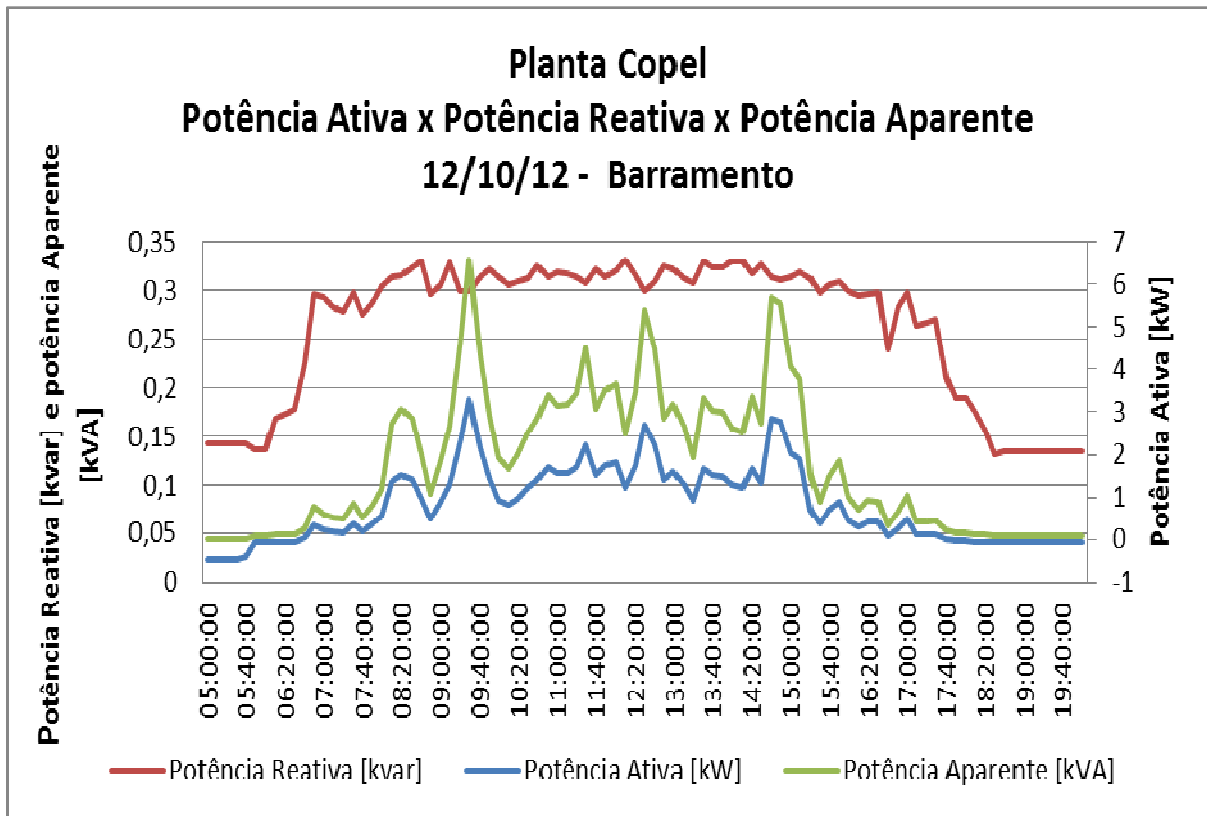


Gráfico 23 – Curvas das Potências no Barramento Geral

Para o gráfico 24, mostra-se o fator de potência gerado em função da potência ativa, assim como no gráfico 23, aqui se tem mais claramente a constância do fator de potência ao longo do dia quando se tem um nível de irradiância solar alta, e baixo índice de fator de potência na saída da inércia do painel e também no seu retorno a condição de repouso. Esta considerável volatilidade do fator de potência nos períodos de pequeno percentual de potência sendo injetada, pode ser também vinculada ao fato do inversor apresentar nestas condições elevados índices de THDv e THDi.

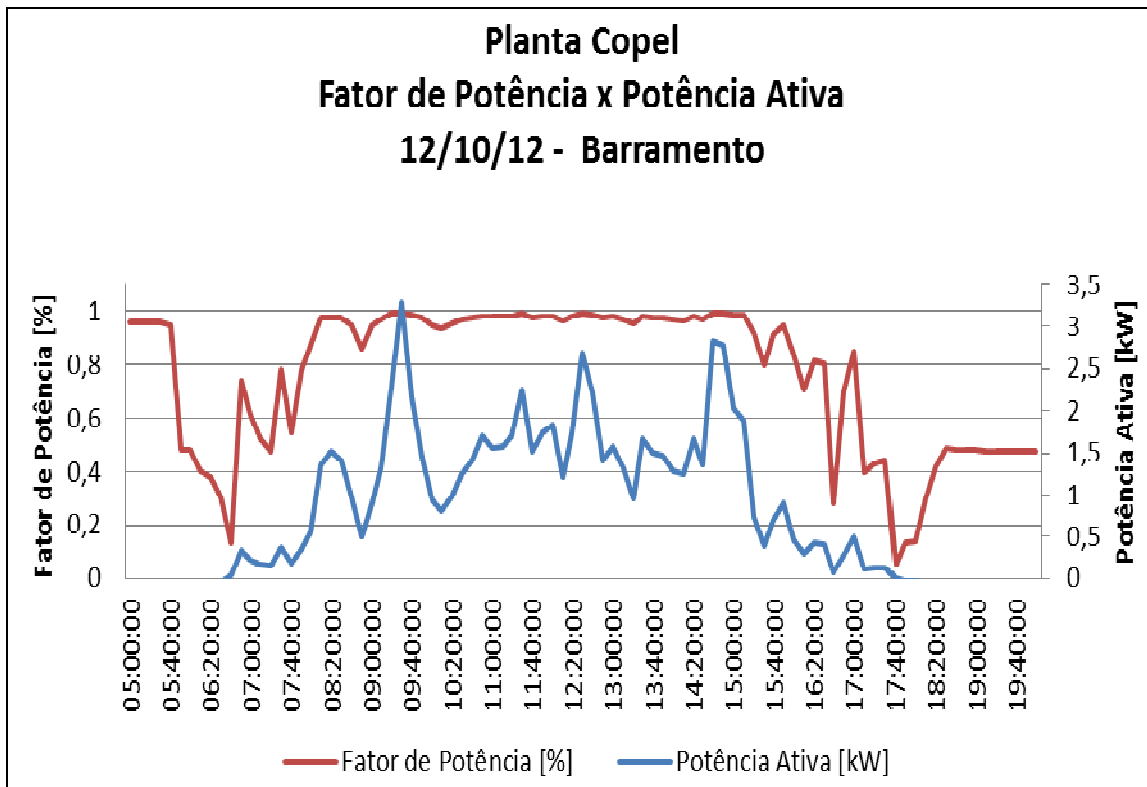


Gráfico 24 – Curva do Fator de potência e da Potência Ativa no Barramento Geral

4.2 SISTEMA ESCRITÓRIO VERDE

4.2.1 Conceito

O Sistema que será apresentado e analisado agora se refere ao Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede instalado no Escritório Verde (EV) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O EV da UTFPR é uma edificação sustentável que adotou diversas estratégias de sustentabilidade, todas buscando a máxima eficiência energética, e dentre elas tem-se a geração fotovoltaica.

A inauguração deste sistema deu-se em 2011, e mesmo não havendo normativa por parte da concessionária de energia para este tipo de conexão na época, buscou-se estreitar os objetivos entre a concessionária e a universidade a fim de permitir a sua conexão ao menos de forma experimental e didática. Dessa forma, uma vez autorizado o seu paralelismo com a rede, possibilitou-se diversos estudos até então realizados. Na figura 10 se tem a vista frontal do Escritório Verde.



Figura 10 - Vista frontal do EV da UTFPR
Fonte: URBANETZ E CASAGRANDE (2012)

4.2.2 Equipamentos Utilizados

O Sistema Fotovoltaico instalado no Escritório Verde possui uma potência instalada de 2,1kWp, composto de 10 módulos marca KYOCERA do tipo silício policristalino, modelo KD210GX-LP conectados em série, ocupando uma área total de 15m². O inversor utilizado é um americano PVPOWERED, modelo PVP2000, de potência nominal de 2kW e tensão de 220V (URBANETZ e CASAGRANDE, 2012). A figura 11 mostra o detalhe da instalação dos módulos fotovoltaicos e do inversor utilizados.



Figura 11 – Painelel Fotovoltalico e inversor do EV da UTFPR
Fonte: URBANETZ E CASAGRANDE (2012)

4.2.3 Resultados Operacionais do Sistema

4.2.3.1 Medições de qualidade de energia

Conforme sistemática adotada para as medições de qualidade de energia no Sistema Fotovoltalico Conectado à Rede instalado na subestação da Copel, para este Sistema do EV buscou-se uma metodologia bastante similar.

Para a medição de qualidade foi utilizado o Medidor e registrador Power Guia 440S da Dranetz Equipment, com características para medição de grandezas trifásicas (Tensão, Corrente, Potências, Fator de Potência), Análise Harmônica, amostragem das formas de onda e espectro harmônico e outros. Para os dados de irradiância solar, buscou-se no banco de dados da UTFPR, os registros da irradiância para o mesmo período da instalação da medição, coletados pelo piranômetro APOGEE, modelo SP-214. A conexão do equipamento foi realizado logo na saída dos inversores, de maneira a registrar os dados de qualidade de energia inerentes à este equipamento. Como também foi citado para a campanha de medidas do Sistema Fotovoltalico da Planta da Copel, não efetuou-se medições de qualidade de energia com o inversor desconectado, de forma que fosse possível comparar os valores levantados com o inversor conectado e sem o inversor em paralelo com a rede. Assim, como sugestão de

trabalhos futuros, tem-se esta metodologia de análise como uma opção, de forma a complementar este trabalho aqui apresentado.

Do dia 22/08/2012 até 27/08/2012 foi realizada a medição de qualidade de energia no Sistema Fotovoltaico do EV, e no gráfico 25, é possível verificar o perfil da irradiância solar para o período descrito. Baseado neste perfil da irradiância solar é que foi definido o dia a ser analisado, a fim de buscar interpretar o comportamento deste Sistema Fotovoltaico quanto às suas características de qualidade de energia.

Diferentemente do Sistema Fotovoltaico da Planta da Copel, para este Sistema do EV, optou-se por analisar apenas o dia de maior irradiância solar do período descrito acima. Assim, conforme se pode verificar no gráfico 25, o dia 23 foi o dia que apresentou o melhor perfil de irradiância, e por isso, as análises a seguir foram realizadas em referência a este dia.

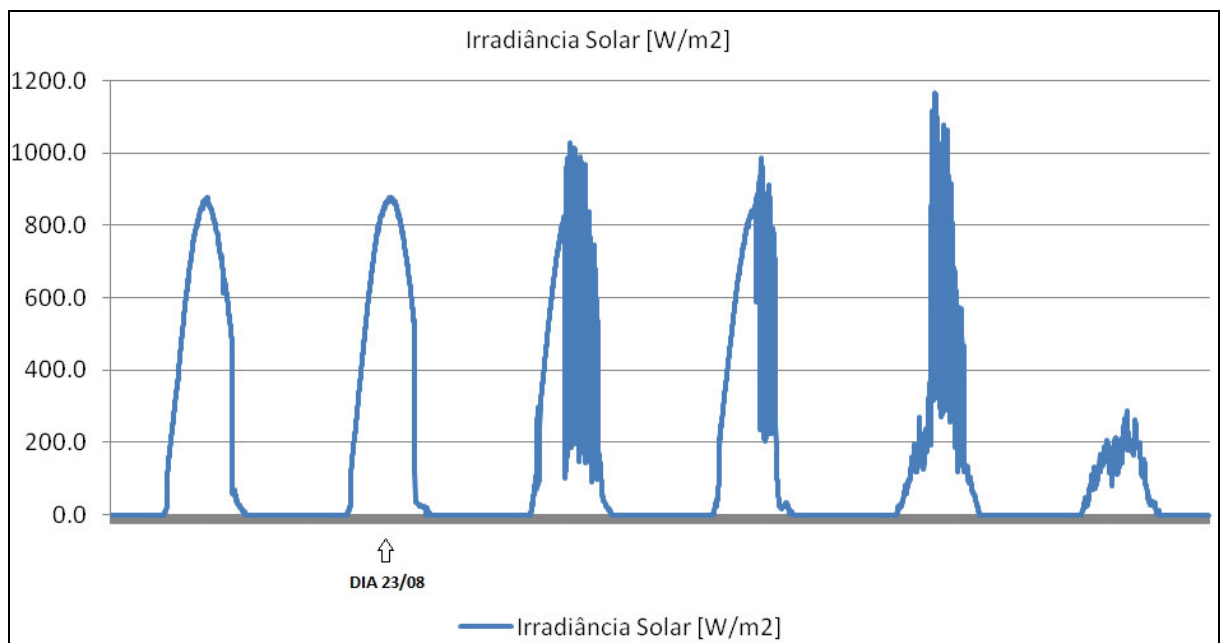


Gráfico 25 - Curva de Irradiância Solar entre os dias 22/08/2012 e 27/08/2012

4.2.3.2 Medições de qualidade de energia no inversor

O método de análise utilizado também foi o de comparação de diversas grandezas medidas na saída do inversor, como tensão fornecida pelo inversor, distorção harmônica total de tensão e de corrente, potências e fator de potência. Confrontando estas diversas grandezas

entre elas e entre o perfil de irradiância do dia 23, apresentam-se na sequência algumas análises e conclusões a este respeito.

A primeira análise que se realizou foi o cruzamento dos dados de registro de tensão da Fase A e da Fase B com o perfil de irradiância do dia 23/08. O gráfico 26 apresenta este detalhamento, no qual é possível perceber uma constante volatilidade em ambas as fases, mas também se permite verificar que, com maior irradiância e conseqüentemente a entrada do inversor, além de haver um maior equilíbrio nos módulos das tensões, elas apresentam uma leve elevação, fato este que também foi verificado no estudo anterior.

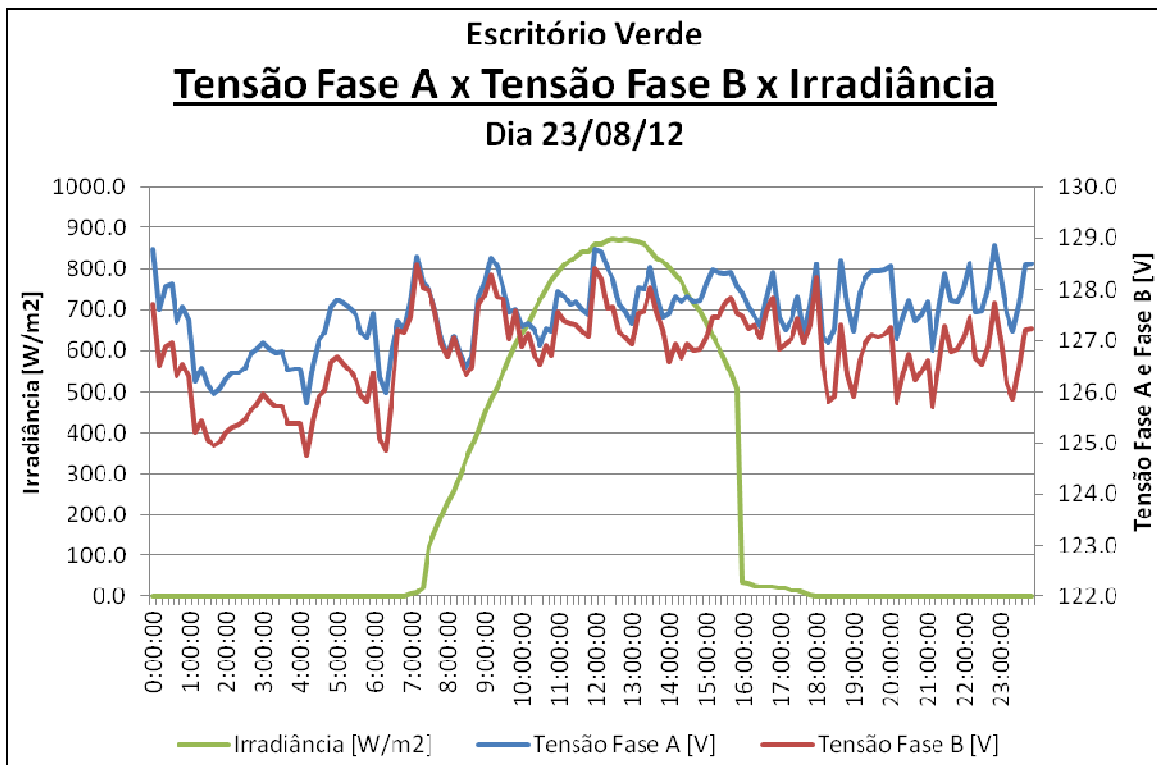


Gráfico 26 - Curva das tensões da Fase A e B e da Irradiância no dia 23/08

De forma similar, apresenta-se agora no gráfico 27 a curva da tensão de linha em relação à irradiância deste dia. Novamente, e agora de forma mais clara, é possível perceber como a entrada do inversor com a sua potência nominal registra um acréscimo no valor da tensão.

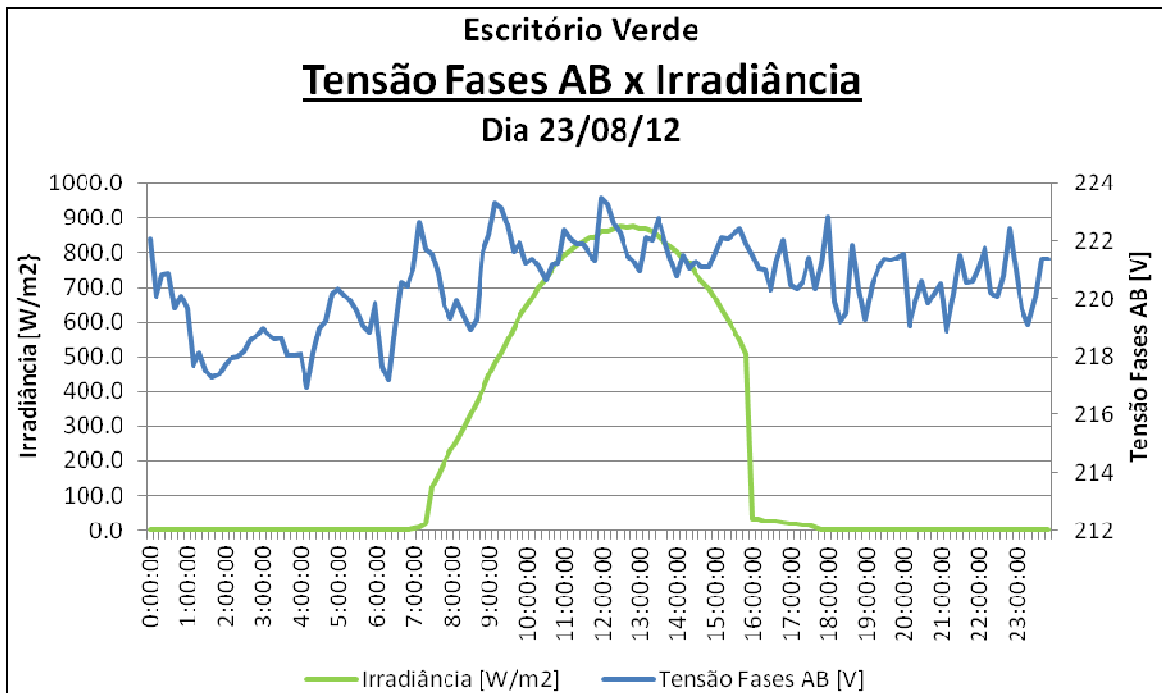


Gráfico 27 - Curva da tensão de linha e da Irradiância no dia 23/08

Passa-se neste momento a verificar o impacto nas distorções harmônicas quando da entrada do inversor. Os gráficos 28 e 29, destacam a sobreposição por fase, da Potência Ativa injetada pela distorção harmônica total de tensão. Em ambos os gráficos, percebe-se uma similaridade da curva de THD tanto da tensão da fase A quanto da fase B. Pode-se notar que ao meio-dia quando o inversor atinge sua potência nominal, há uma clara redução em torno de 0,5% na distorção harmônica de tensão, caindo de aproximadamente 3,5% para a faixa de 3% na fase A, e de 3,2% para 2,7% na fase B. A partir do momento que o inversor começa a decrescer a potência injetada, tem-se o retorno da distorção harmônica para os patamares de 3,5% e 3,2% respectivamente. Somente a partir das 17:30h, horário que provavelmente estava se encerrando as atividades daquele dia no EV, é que os níveis de distorção harmônica total apresentam uma queda mais acentuada, devido provavelmente ao desligamento de cargas não lineares, como computadores, presentes durante o dia no EV.

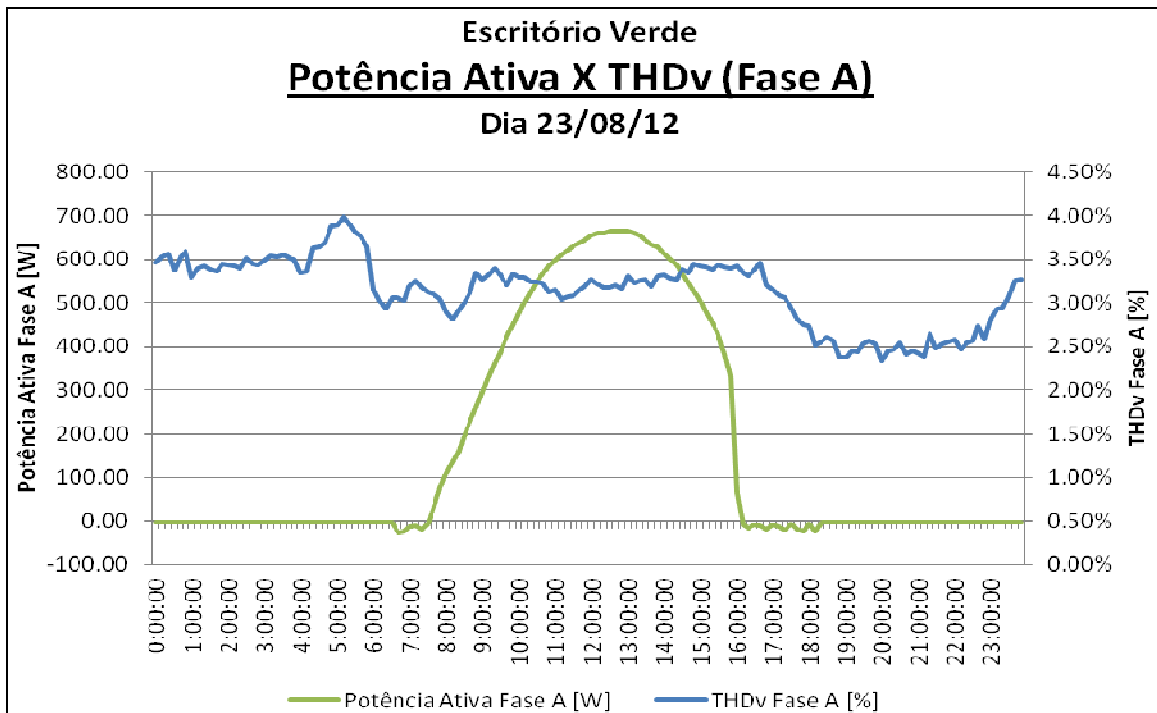


Gráfico 28 - Curva da Potência Ativa e da THDv (Fase A) no dia 23/08

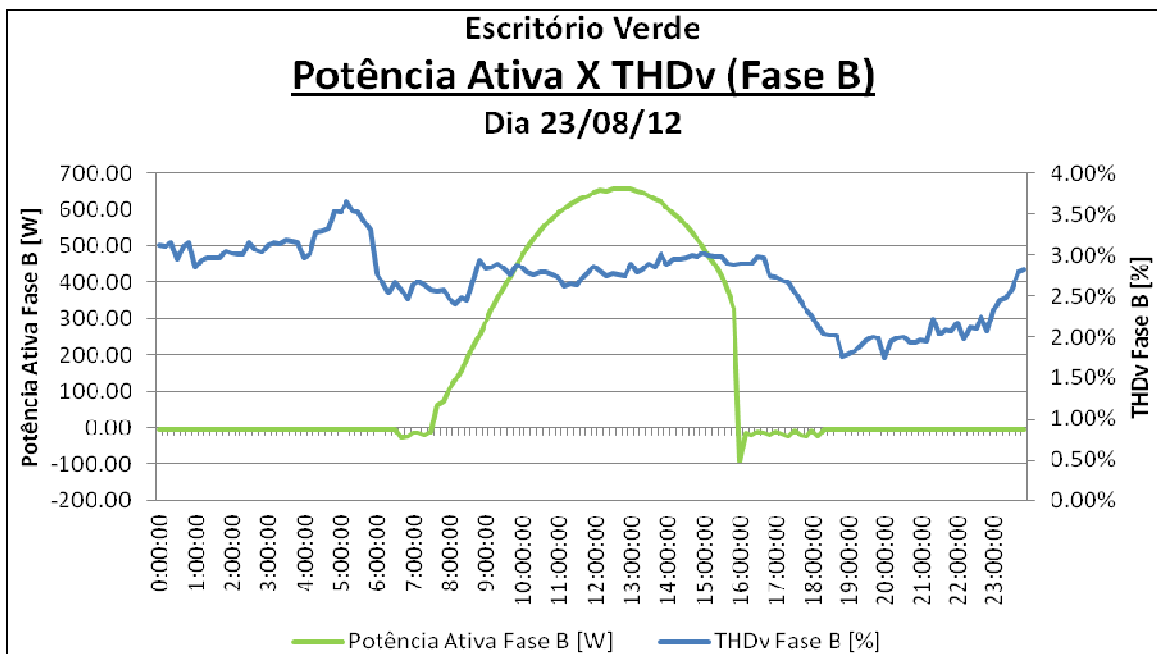


Gráfico 29 - Curva da Potência Ativa e da THDv (Fase B) no dia 23/08

Além da THD de tensão, inclui-se agora também a THD de corrente, juntamente com o perfil de potência ativa fornecida à rede. Neste momento, se faz necessário destacar que

realizou-se medições apenas com o inversor conectado, ou seja, como agora passa-se a analisar o perfil de THD de corrente, estas distorções podem ter sido originadas tanto pelo inversor quando pela carga a que o inversor está alimentando. Com uma medição da corrente das cargas pode-se esclarecer e orientar o estudo com maior precisão neste sentido.

Isto posto, verifica-se no gráfico 30, que novamente a distorção harmônica de corrente tem um elevado percentual quando o inversor não está operando, conforme percebeu-se também nas medições realizadas na planta da Copel, mais uma vez demonstrando que isto pode ser devido à ruídos, interferências e/ou induções nos sensores de corrente, de modo a alterar os níveis de THDi, tendo em vista que o valor da corrente efetivamente injetada neste momento se aproxima de zero. Já em relação ao início e término do dia, períodos em que o inversor está com baixo percentual de injeção de potência, fica claro a grande variação do percentual de THD de corrente em um curto intervalo de tempo, demonstrando que realmente nestes momentos o inversor opera com valores altos de THD de corrente. Isto também pode ser um indício de piora da THD de tensão, pois dependendo do valor da corrente fundamental, a distorção do THD de tensão é ainda maior (URBANETZ, 2010).

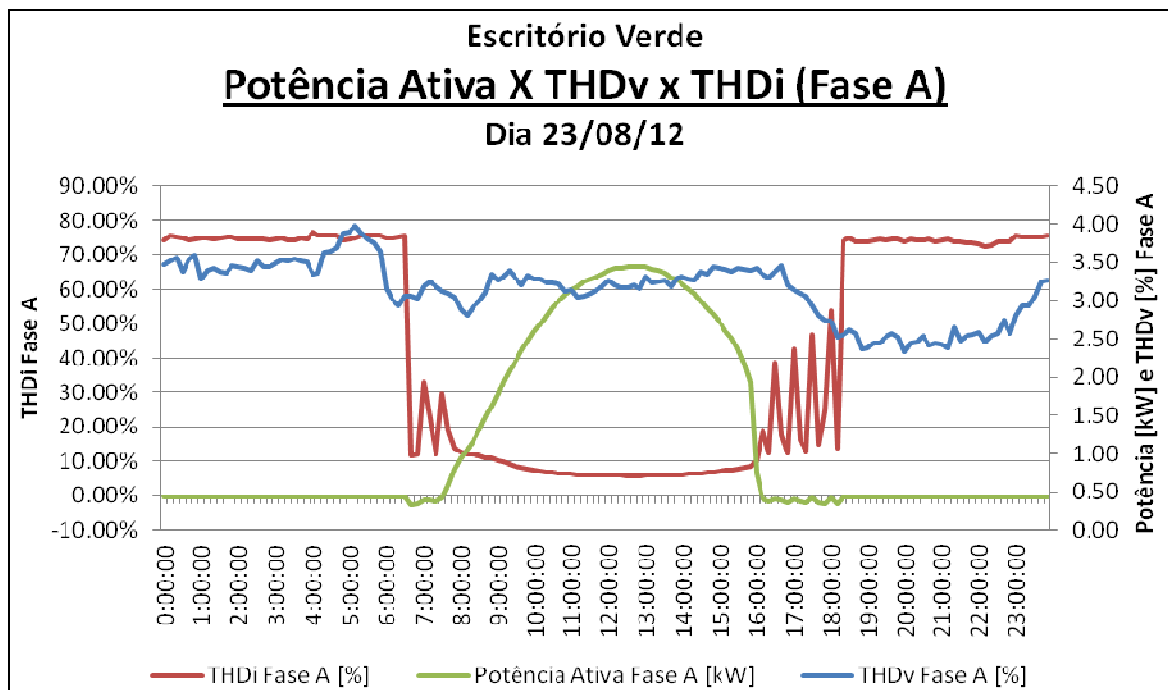


Gráfico 30 – Curva da Potência Ativa, da THDv e THDi (Fase A) no dia 23/08

Colocando agora no mesmo gráfico a tensão de linha juntamente com as THD de tensão da fase A e da fase B, pode-se realizar uma análise mais completa das harmônicas de

tensão. Analisando o gráfico 31 visualiza-se esta configuração. Mais uma vez, pode-se apresentar aqui uma redução e/ou aumento da distorção devido à tensão da rede da concessionária e não ao inversor, pois estando o inversor em paralelo com a rede, e a medição sendo efetuada na sua saída, estas distorções podem ser de ambos os lados do circuito, e assim, podem ser melhor exploradas em um outro estudo.

Tendo em vista estes fatores colocados, buscou-se avaliar estes perfis levantados. Salvo o período entre às 04:00h e às 06:00h, o qual apresentou um súbito aumento da THD ao mesmo tempo que a tensão de linha também se elevou, nos demais períodos tem-se uma certa correlação da tensão com a THD de cada fase, com um maior reflexo de queda das THD no horário que o inversor está se desconectando, sem apresentar grandes alterações na tensão.

Próximo ao meio-dia, com a potência máxima do inversor, tem-se uma leve melhora nos indicadores de THD de tensão, sendo que estes já são baixos, então não chegam a apresentar uma queda mais relevante, como era de se esperar nesta situação (URBANETZ, 2010).

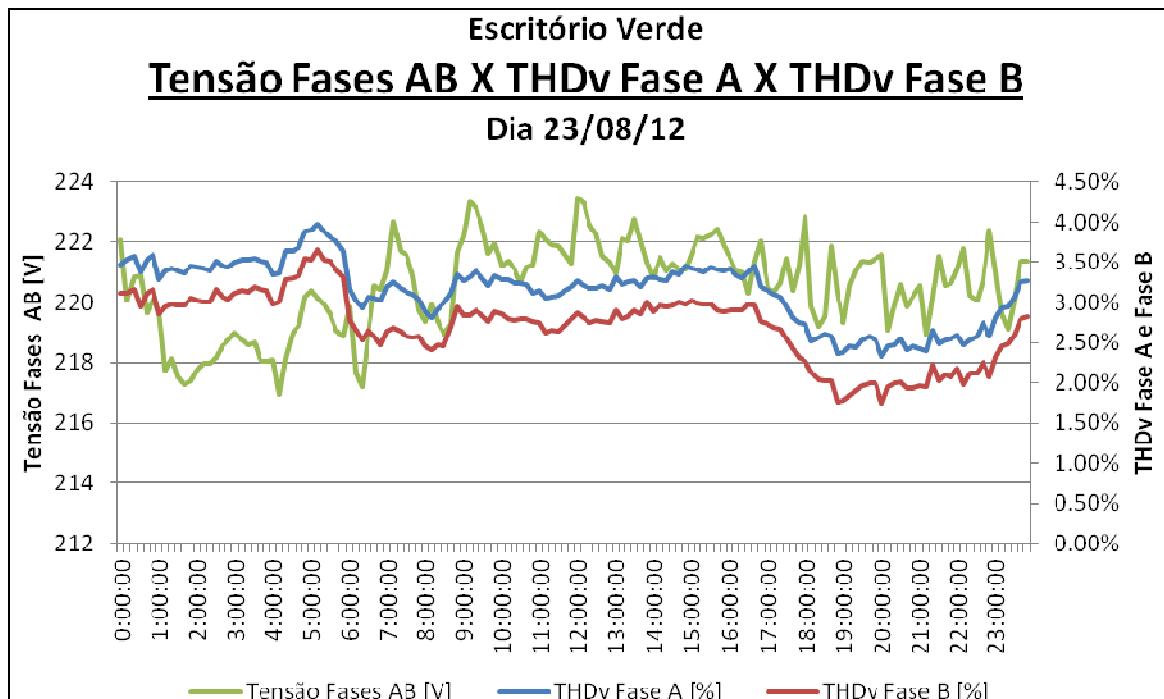


Gráfico 31 - Curva da Tensão de Linha, da THDv e THDi (Fase B) no dia 23/08

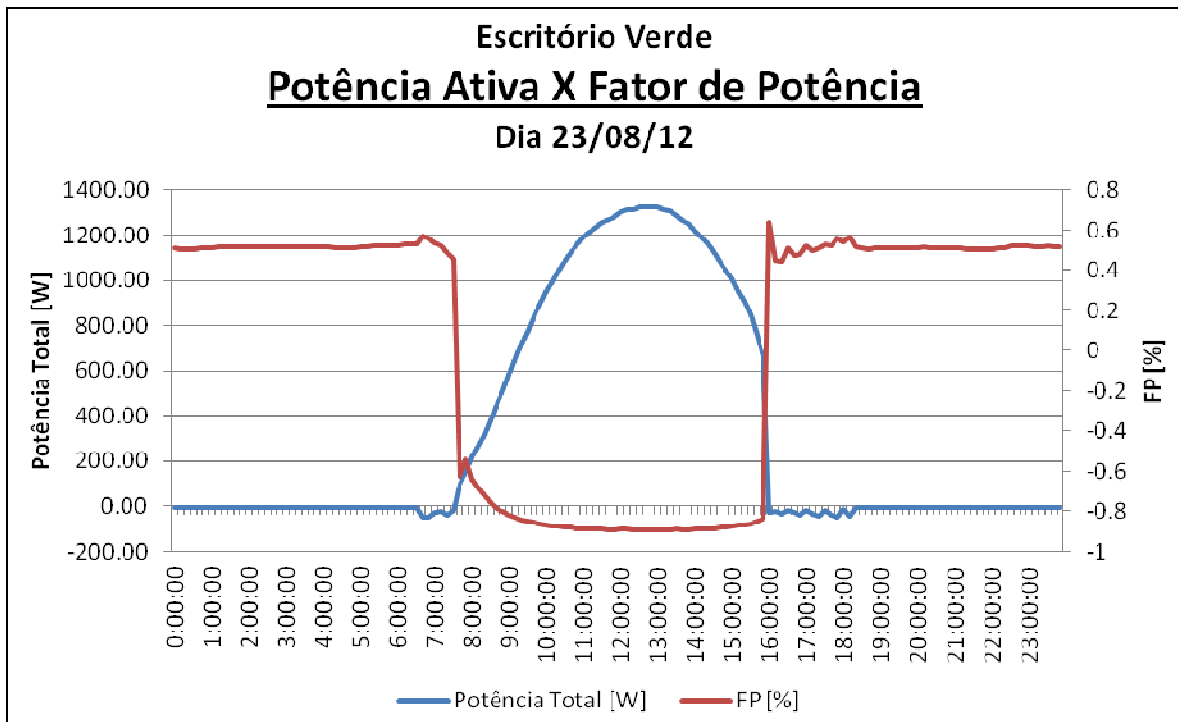


Gráfico 32 – Curva da Potência Ativa e do Fator de Potência no dia 23/08

Finalizando através do gráfico 32 o estudo do Sistema Fotovoltaico do EV, tem-se a curva da Potência Ativa injetada sobreposta à curva do Fator de Potência ao longo do dia 23. Esta visível “melhora” no percentual do fator de potência pode ser explicado pelo mesmo motivo que se viu em relação aos elevados índices de THDi registrados quando o inversor não está operando. Como neste período o valor da corrente fornecida pelo inversor tende a zero, qualquer interferência que se tenha na medição, pode refletir-se em baixos percentuais de fator de potência, caracterizados neste caso, por reatâncias capacitivas.

5 CONCLUSÃO

A partir da metodologia descrita, foi possível atingir tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos deste trabalho.

De posse dos levantamentos dos parâmetros de qualidade de energia obtidos junto às instalações do Sistema Fotovoltaico da Copel, como também do Escritório Verde da UTFPR, foi possível identificar e analisar a interação que estes sistemas apresentam quando conectados em paralelo com a rede de distribuição da concessionária.

Buscou-se focar os estudos no comportamento da tensão e das distorções harmônicas totais de tensão no ponto de conexão, tendo em vista que as medições foram realizadas apenas nos períodos em que os inversores estavam operando, e como a carga que se encontrava conectada aos inversores era dinâmica, uma análise mais ampla da qualidade de energia no ponto medido, necessitaria do conhecimento das características das cargas ligadas.

Para essa condição, observou-se que na entrada em operação do inversor, há uma perceptível elevação da tensão no ponto de conexão, principalmente nos momentos que o inversor opera próximo ou no valor nominal da sua potência. Esta característica foi verificada em ambos os sistemas fotovoltaicos analisados. Quanto aos índices de distorção harmônica total de tensão no ponto analisado, percebeu-se um leve incremento desta distorção harmônica de tensão quando da entrada do inversor, o qual pode ser atribuído ao fato de o conteúdo harmônico da tensão já ser muito baixo, e com a entrada do inversor esta condição de baixo THDv acaba sendo levemente alterada. Estas características foram verificadas nos dias de alta irradiância solar, pois nos dias de baixa irradiância que foram estudados, o inversor opera com um percentual baixo em relação à sua potência nominal, e tanto os níveis de THD de tensão como de corrente, juntamente com a presença de outras cargas na rede, deformam a corrente injetada pelo inversor, e assim prejudicam as análises.

Em relação às análises de THD de corrente, quando se avalia na situação de potência máxima injetada, ou seja, próximo ao meio-dia, percebe-se que o conteúdo harmônico da corrente não fica abaixo de 7%, ou seja, bem acima do limite máximo permitido de 5% pela

ABNT NBR 16149, o que caracteriza a presença de cargas não lineares no circuito elétrico no ponto de conexão. Outro ponto importante a ser destacado, diz respeito ao início e ao término de operação do inversor, onde verificou-se uma forte volatilidade no perfil da THDi. Isto pode ser explicado pelo início de injeção de potência do inversor na rede, momento este que conforme já foi citado, apresenta forte aparecimento de THDi e de um leve incremento de THDv.

Para a condição de paralelismo dos dois inversores na rede da concessionária, os resultados das análises não apontaram nenhuma divergência em relação aos dados e conclusões até aqui abordados.

Os resultados apresentados pelo sistema fotovoltaico do EV se mostraram próximos dos verificados no sistema da Copel. Os níveis de tensão se mostram levemente superiores quando da entrada em operação do inversor, mas a THD de tensão teve um pequeno decréscimo, divergindo assim dos dados analisados anteriormente na planta da Copel, mas em acordo com o estudo apresentado em Urbanetz, 2010.

Já em relação ao início e término do dia, períodos em que o inversor está com baixo percentual de injeção de potência, fica claro a grande variação do percentual de THD de corrente em um curto intervalo de tempo, demonstrando que realmente nestes momentos o inversor opera com valores altos tanto de THD de tensão quanto principalmente de corrente. Outros pontos a destacar são os níveis de distorção harmônica de corrente e do percentual do fator de potência quando o inversor não se encontra operando. Por uma característica das instalações analisadas e também dos sensores de corrente utilizados, provavelmente teve-se algumas interferências externas ou até mesmo do circuito analisado, que vieram a elevar drasticamente as THDi e apresentar baixo fator de potência nestes períodos sem irradiação solar. Como para este período a corrente injetada é bem próxima de zero, qualquer acréscimo neste valor pode ter uma influência percentualmente grande na THDi e no fator de potência.

Analisar a qualidade de energia elétrica é diferente de se falar em análise da qualidade de potência. O que ocorre é que pontualmente, instantaneamente, pode-se realmente encontrar muitas situações de elevados índices de distorção harmônica, devido àquele momento em que se está efetuando determinada análise. Mas quando se fala em Qualidade de Energia, analisa-se a energia ao longo de um dia completo, de uma semana, e essa integração total apresenta

um índice de qualidade provavelmente muito superior ao de uma medição pontual, pois neste caso, a maior parte da energia sendo fornecida pelos inversores na sua potência máxima, ou seja, período este que os inversores apresentam os melhores níveis de THD de tensão e corrente.

Isto posto, pode-se concluir através das análises aqui apresentadas, que os índices de qualidade levantados atendem aos requisitos normalizados hoje vigentes. Apenas alguns valores pontuais como as elevadas taxas de distorções harmônicas de corrente em determinados momentos é que merecem um estudo mais aprofundado.

Dessa forma, como sugestão de trabalhos futuros, pode-se citar a análise da qualidade de energia fornecida pelos inversores, confrontada com a análise da qualidade de energia das cargas com os inversores desconectados, possibilitando assim, maiores conclusões principalmente em relação à THD de corrente fornecidas pelos inversores.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 16149, 2013. Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.

ANEEL, 2012. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_4.pdf. Acesso em 01 de Setembro de 2013.

ANEEL, 20xx – Energia Hidráulica - Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/04-Energia_Hidraulica%282%29.pdf. Acesso em 15 de Agosto de 2013.

ANEEL, 20xx – Energia Solar - Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar%283%29.pdf. Acesso em 15 de Agosto de 2013.

BRASIL.GOV, 2013 – Energia Eólica. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/energia-eolica>. Acesso em 18 de Agosto de 2013.

AES ELETROPAULO, 2012 – NT 6.012 – Requisitos para Interligação de Microgeração e Minigeração Distribuída com a Rede de Distribuição da AES Eletropaulo com Paralelismo Permanente Através do Uso de Inversores – Consumidores de Média e de Baixa Tensão;

CASAGRANDE JUNIOR, Eloy Fassi; URBANETZ, Jair - VIII CBPE - 2012. Disponível em: <http://www.sbpe.org.br/viii-cbpe/apresentacoes/EscritorioVerde-EloyFassiCasagrande-UTFPR>. Acesso em 06 de Setembro de 2013.

CCEE, 2013 – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afzLoop=125872427537000#%40?_afzLoop%3D125872427537000%26_adf.ctrl-state%3De30qe03yh_82. Acesso em 15 de Agosto de 2013.

CEEE-D, 2013 - NTD.00-081– Acesso de Micro e Mini Geração com Fontes Renováveis e Cogeração Qualificada ao Sistema de Distribuição;

CELPE, 2012 - VM02.00-00.004 - Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição de Baixa Tensão;

CRESESB, 2004. Ceto de Referencia para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. Coletânea de Artigos: Solar e Eólica. Volume 2. CRESESB/CEPEL. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro>. Acesso em 20 de Agosto de 2013.

COELBA, 2012 - SM04.14-01.011– Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição em baixa Tensão;

COPEL, 2012 - NTC905100, Manual de acesso de geração distribuída ao sistema da Copel;

COPEL, 2005 - Manual de Eficiência Energética na Indústria.

ENERSUL, 2012 - NTD-CMB-001, Conexão de Microgeradores ao Sistema de Distribuição de Baixa Tensão;

INNMETRO, 2011. Portaria N 004. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>. Acesso em 02 de Setembro de 2013;

LIGHT, 2012 - IT DTE/DTP 01/12, Procedimentos para a Conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição da Light SESA – Conexão em Baixa Tensão;

PORTAL DE ENERGIA, 2013. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/>. Acesso em 07 de Setembro de 2013.

SMA Solar Technology AG. Disponível em: http://www.sma.de/fileadmin/content/global/Products/Documents/Wechselrichter_ohne_Trafo/SB_HF-KEN112411.pdf. Acesso em 13 de Setembro de 2013.

URBANETZ, Jair; TIEPOLO, Gerson Máximo; FUSANO, Renato Hideo; CASAGRANDE JUNIOR, Eloy Fassi – REVISTA SODEBRAS – Volume 8 – Nº 88 - 2013. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N88.pdf>. Acesso em 06 de Setembro de 2013.

URBANETZ JR, Jair – Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia Elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade, 2010.