



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA
MARCELO LUIZ FONTÃO

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA
EM SISTEMA FOTOVOLTAICO
EM OPERAÇÃO PARALELA COM A
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

PALHOÇA

2017

MARCELO LUIZ FONTÃO

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA
EM SISTEMA FOTOVOLTAICO
EM OPERAÇÃO PARALELA COM A
REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de graduação de Engenharia Elétrica, da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Profº Djan Rosário

PALHOÇA

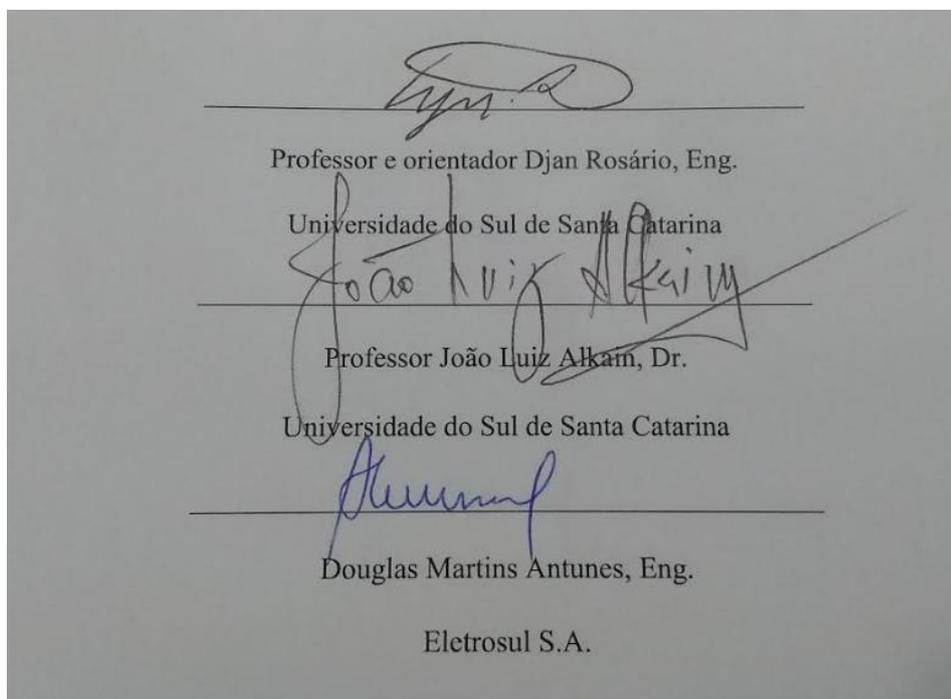
2017

MARCELO LUIZ FONTÃO

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM
OPERAÇÃO PARALELA COM A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina,

Palhoça, 04 de dezembro de 2017.



RESUMO

Em um mundo que se encontra cada vez mais dependente da energia elétrica, e pela grande demanda da mesma, é cada vez mais indispensável a busca por novas maneiras de obtê-la, sobre tudo como fontes renováveis e de pouco impacto ambiental. Dentro as inúmeras fontes possíveis, a energia solar fotovoltaica se destaca pela forma prática, confiável e limpa, podendo ser inserida em redes *on grid*, de alta, média e baixa tensão. *Todavia, a conexão de diversas plantas microgeradoras à rede, tende a trazer a possibilidade de gerar perturbações na mesma.* Este Trabalho de Conclusão de Curso analisa a qualidade da energia elétrica no que refere e demonstra a necessidade de encararmos os efeitos harmônicos de uma usina fotovoltaica em redes *on grid*, através de valores extraídos diretamente da rede da subestação da usina Megawat solar na cidade de Florianópolis, SC. Fora empreendido medições durante um período de 8 dias com o auxílio de um analisador de qualidade de energia. Chegando a conclusão de que a necessidade de buscar fontes alternativas para a obtenção de energia elétrica, deve ser calçada na qualidade da energia da obtenção desta, para que não implique em problemas futuros para a rede da concessionária de energia.

Palavra-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Qualidade de Energia Elétrica. Distorção Harmônica.

ABSTRACT

In a world that is increasingly dependent on electricity, and because of its great demand, it is increasingly indispensable to look for new ways of obtaining it, especially as renewable sources and of little environmental impact. As many sources as possible, photovoltaic solar energy stands out for its practical, reliable and clean shape, and can be inserted into grids, high, medium and low voltage. However, a connection of several micropower plants to the network, tends to bring a possibility of generating disturbances in the same. This work, which is presented, analyzes the quality of electric energy, is not the reference and demonstrates a need to consider the harmonic effects of a photovoltaic plant in networks in the network, through values extracted directly from the network of the plant substation Megawat solar In the city of Florianópolis, SC. Measurements were taken over a period of 8 days with the aid of a power quality analyzer. Arriving at the conclusion that the need to seek alternative sources for a procurement of electricity, should be paved in the quality of procurement energy, so that not implicit in future problems for the network of the utility.

Keyword: Photovoltaic Solar Energy. Quality of Electric Power. Harmonic Distortion.

LISTA DE ABREVIACÃO

KWh – quilo watt hora

MWp – megawatts-pico

CC – corrente contínua

CA – corrente alternada

m² – Metro quadrado

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

QEE- Qualidade Energia Elétrica

ONS – Operador Nacional do Sistema

IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional

THD – Distorção Harmônica Total

FV – fotovoltaico

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

IEEE – Instituto de Engenheiros Elétricista e Eletrônicos

DTD – Distorção Total de Demanda

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

KV – quilo volt

W - warts

SUMÁRIO

Capítulo 1 Introdução	8
1.1 - Problemática	9
1.2 – Objetivos.....	10
1.2.1 – Objetivos Específicos.....	11
1.3– Justificativa	11
1.4 – Estrutura da Monografia	11
1.5 – Limitação do trabalho	12
1.6 –Metodologia	12
Capítulo 2 QEE -Qualidade da Energia Elétrica	14
2.1 - Harmônicos	15
2.1.1 – Efeitos harmônicos em componentes do sistema elétrico.....	18
2.1.2 –Indicadores harmônicos	21
2.2 – Equipamentos Geradores de harmônicos.....	23
2.3 – Qualidade de Energia Elétrica	24
2.4 – PRODIST.....	25
Capítulo 3 Informações sobre o projeto Megawatt Solar da Eletrosul	31
3.1 – Usina Megawatt Solar Eletrosul	31
3.2 – Inversor Conest TMTL 15000	35
Capítulo 4 Medições de qualidade de energia na UFV Megawatt Solar	38
4.1 Equipamentos utilizados	38
4.2 - Resultados das Medições	40
4.3 - Medições de Qualidade de Energia com a UFV Megawatt Solar operando	40
Capítulo 5 Conclusão	55
Capítulo 6 Referências Bibliográficas	57

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Análise de Qualidade de Energia em Sistema Fotovoltaico em Operação Paralelo com a Rede de Distribuição de Energia Elétrica

A utilização da energia elétrica foi ampliada a partir dos séculos 19 e 20, estes dois séculos de consumo abusivo de energia, de falta de consideração com as consequências ambientais como industrialização, consumismo e do esgotamento de recursos naturais, trouxe desequilíbrio para o planeta em que vivemos. As últimas 3 décadas do século 20 revelaram uma mudança de caminhos que se refletem tanto no grau de consciência, como de exigências da população para políticas públicas voltadas à redução de impactos ambientais. No âmbito das políticas públicas e das ciências, dois marcos apareceram nesse período: a necessidade de um desenvolvimento mais sustentável e a importância de como financia-lo e torna-lo realidade (Phipps, J. K., Nelson, J. P).

O setor de energia, por sua vez, atravessa este período muito visado tanto pelos efeitos negativos ao meio ambiente como para as populações, causados por projetos de grande porte como usinas hidrelétricas, termoelétricas, nucleares, quanto pelo desperdício e pela ineficiência de sua produção e de uso, exemplo disto está no fato da energia produzida no mundo vem da matriz de combustíveis fósseis, e esta que, para gerar 100 calorias de eletricidade necessita 300 calorias de carvão, tendo um aproveitamento aproximado de apenas 33 %. Eficiência energética é a capacidade de utilizar menos energia para produzir a mesma quantidade de iluminação, aquecimento, transporte e outros serviços baseados na energia (ANA org/cd2/livro.doc pag 32).

A eficiência energética veio se tornando cada vez mais um ponto recorrente nas discussões sobre a demanda de energia em nível global e possui hoje um papel preponderante nas políticas mundiais de energia e de meio ambiente, em especial naquelas relacionadas às mudanças climáticas. A imposição alavancada das últimas décadas finais do século 20, levou a necessidade de procurar formas de energia mais limpas, com menor impacto ao meio ambiente, a energia solar foi uma destas alternativas, que acabou sendo largamente utilizada, financiada, estudada, com consideráveis avanços tecnológicos da produção de equipamentos

eletrônicos e de eletrônica de potência, elevando a sua participação na matriz energética brasileira e mundial, exemplo disto pode-se citar agosto\2015, só o Brasil fez o primeiro Leilão de Energia de

Reserva com projetos solares fotovoltaicos, contratando 1.043,7 MWp (megawatts-pico) de potência de 30 projetos diferentes. A estimativa da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê que até 2050, 50% de todo o abastecimento das residências no País seja feita pelas placas fotovoltaicas que aproveitam a energia solar. (Eletrosul, 2017).

O Brasil apresenta um dos maiores índices de irradiação solar do mundo. Com a maior parte do seu território nacional entre a linha do Equador e o Trópico de Capricórnio, não apresentando, assim, grandes variações de radiação solar ao longo do dia. Os valores anuais de radiação solar global incidente variam entre 1.550 e 2.400 kWh/m² ao longo do território nacional e são superiores aos da maioria dos países da União Europeia, como, por exemplo, a Alemanha (900 – 1.250 kWh/m²) e a França (900 –1.650 kWh/m²). (O Setor Elétrico, 2017).

A necessidade em buscar novas fontes de geração de energia elétrica trouxe novos rumos a políticas energéticas, dando a matriz energética mundial um aumento de 395% da produção primária de energia solar entre 2003 e 2013. Houve um crescimento de 17% na produção total de energia no mesmo período, enquanto que as fontes renováveis tiveram um crescimento de 56%. A energia solar só foi superada pela energia eólica (SILVA, 2015).

1.1 Problemática:

A demanda pela energia fotovoltaica traz benfeitorias, mas também pode trazer problemas ao sistema elétrico se não for devidamente desenvolvida, a grande utilização dos inversores em sistema fotovoltaico, para transformação da tensão CC em CA, cria diversas perturbações, um exemplo são os harmônicos. Dentre os principais efeitos das componentes harmônicas citam-se: solicitações dielétricas (por sobretensão), solicitações térmicas (por sobrecorrente), operação indevida ou erro em diversos equipamentos de controle, proteção e medição (relés, medidores, controles eletrônicos, dentre outros) e perda de vida útil acelerada ou queima precoce de capacitores, cabos, motores e transformadores, com redução de eficiência e aumento de perdas, reduzindo a qualidade da energia fornecida pelo sistema.

Tradicionalmente projetados para produção centralizada, os sistemas de energia, tem na penetração de sistemas de geração distribuída na rede, causado mudança nesse perfil de produção, criando novos desafios operacionais que se fazem importantes para a reestruturação dos sistemas tradicionais. No entanto, este novo cenário do sistema elétrico, introduzido pela resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, obteve para as atividades de operação às distribuidoras de energia um novo panorama e manutenção de suas redes e ativos, principalmente no que cabe ao vai vem do fluxo de potência na rede, nascido pela conexão de sistemas de geração distribuída. Os diversos impactos da demanda desta tecnologia devem ser previstos e analisados, sobretudo em redes de distribuição, para que haja a necessidade de garantir os padrões mínimos de qualidade da energia desde o ponto de consumo, e evitar o comprometimento das cargas alimentadas. Dentre os inúmeros impactos, destaca-se o efeito sobre os bancos de capacitores devido à injeção de distorções harmônica produzida pelos inversores de sistemas fotovoltaicos, que sob certas condições, produzem conteúdo harmônico com nível acima do limite normatizado, podendo excitar uma condição prévia de ressonância no barramento.

1.2 Objetivos

Objetivo geral – Caracterizar e quantificar os harmônicos em corrente emitida em sistemas fotovoltaicos para rede da concessionária de energia elétrica, observando os possíveis efeitos das mesmas e apontando alternativas para correção.

1.2.1 Objetivos específicos

- * Buscar subsídios para verificar a real necessidade de sistemas fotovoltaicos em redes de distribuição, buscando verificar as vantagens e desvantagens.
- * Fortalecer o conceito de harmônicas, elevando o grau de discernimento quanto aos seus impactos.
- * Gerar fatos novos acerca da operação de sistemas fotovoltaicos on grid.

* Estabelecer a interrelação entre a introdução de novas matrizes energéticas e a preservação da qualidade do fornecimento.

1.3 Justificativa

Em um mundo em constante evolução, a energia elétrica mostra-se uma necessidade sem precedentes, sendo a busca por novas fontes para torna-lo um sistema elétrico confiável, seguro e livre da poluição dos efeitos nocivos dos gases do efeito estufa, uma meta com rumos para a energia considerada limpa, como a fotovoltaica.

O aumento da demanda por esta fonte alavancou a redução dos custos de geração, evolução tecnológica, a incentivos governamentais e supragovernamentais, como exemplo de bancos europeus financiando amplamente usinas fotovoltaicas em outros continentes, inclusive nosso País. Mas a adoção desta fonte a redes interligadas, pode ocasionar problemas que se não for melhor estudada, uma vez que sistemas eletrônicos de potência como os inversores podem ocasionar problemas na operação e na qualidade do fornecimento, poderá frear o entusiasmo na adoção destes sistemas. Este trabalho, então, ao realizar uma pequena análise dos efeitos de harmônicos em usinas fotovoltaicas ligadas a rede da concessionária de energia elétrica, mostrando os seus benefícios e malefícios para um sistema on grid, através da observação do resultado na usina solar da Eletrosul. Justifica-se por contribuir para uma melhor compreensão acerca da temática escolhida, elencando os problemas eventualmente detectados no estudo, bem como medidas para solução ou prevenção, colaborando para uma aplicação segura desta modalidade, quando de sua conexão ao Sistema Elétrico de Potência.

1.4 Estrutura da monografia

- Introdução a respeito da necessidade da energia elétrica no mundo moderno,
- Geração distribuída,
- Desenvolvimento sobre o tema, harmônico em corrente e efeitos a rede elétrica da concessionária (*on grid*).
- Verificação e amostragem dos dados retirado do estudo de caso projeto Megawatt solar Eletrosul.

1.5 Delimitação do trabalho

O trabalho proposto tem por limitação averiguar a qualidade de energia elétrica da Usina Mega Watt Solar da empresa Eletrosul S.A., quanto ao fator de potência, corrente de harmônicos, frequência de rede, que a mesma possa produzir para a rede da concessionária Celesc S.A..

1.6 Metodologia

A seguir é descrita a metodologia utilizada para a realização deste trabalho, detalhando os procedimentos realizados com o objetivo de determinar as distorções harmônicas de corrente em um sistema fotovoltaico junto a concessionária de energia.

A pesquisa, em sua forma elementar, basear-se-á em livros e trabalhos acadêmicos da área em questão, dando ao trabalho uma classificação bibliográfica em sua primazia. Além disso, por se tratar de trabalho de conclusão de curso, onde o acadêmico é formalmente inserido no contexto da pesquisa científica, esta tem natureza exploratória, pois se trata do debut do estudante em seu primeiro contato com esta atividade acadêmica, conferindo assim a oportunidade de aplicação do método, não necessariamente abrangendo uma contribuição original, mas certamente elevando o grau de conhecimento do iniciante com o assunto a ser pesquisado.

Nesta busca pela ampliação acerca do tema a ser estudado, tem-se a confrontação da pesquisa bibliográfica com dados a serem obtidos do mundo real, através de estudo de caso que será levado a cabo em duas plantas de geração fotovoltaica, caracterizando assim a pesquisa indo além da coleta de informações nas fontes bibliográficas.

Apesar desta última característica do trabalho, é importante salientar que os dados obtidos a partir do estudo de caso não será tratado à luz do ferramental estatístico disponível, como a obtenção de curvas utilizando algum método de regressão, a fim de explicar o comportamento das variáveis envolvidas no estudo. Enfatiza-se então aqui que tais dados coletados serão tratados a fim de elevar a compreensão qualitativa dos fenômenos a serem pesquisados, tornando assim o trabalho restrito a este caráter.

No Capítulo 1 apresenta-se o tema principal deste trabalho, destacando os objetivos e as questões importantes que levaram a tratar do assunto.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as definições básicas relacionadas com a Qualidade da Energia Elétrica. Esta revisão tem o objetivo de demonstrar a relação entre a QEE e a Eletrônica de Potência. Além disso, estão relacionados os equipamentos que geram harmônicos em uma usina solar, inversores, e também os efeitos desta distorção harmônica na rede elétrica. Por fim, são apresentadas as normas com os limites de distorção permitidos.

No Capítulo 3 são apresentadas informações sobre o projeto Megawatt Solar da Eletrosul.

No capítulo 4 é apresentado a configuração do sistema elétrico estudados, a partir das medições realizadas é feita a análise de todos os pontos de medição de corrente para avaliar a injeção de harmônicos na rede elétrica gerados pelas instalações em questão.

O Capítulo 5 apresenta a modelagem da planta estudada com suas características e peculiaridades. A partir dos resultados da medição são identificados os pontos em desacordo com as recomendações do Operador Nacional do Sistema e a norma Brasileira.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões a respeito do projeto Megawatt solar da empresa Eletrosul S.A.

CAPITULO 2 QEE -QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as definições básicas relacionadas com a Qualidade da Energia Elétrica. Esta revisão tem o objetivo de demonstrar a relação entre a QEE e a Eletrônica de Potência. Além disso, estão relacionados os equipamentos que geram harmônicos em uma usina solar, inversores, e também os efeitos desta distorção harmônica na rede elétrica. Por fim, são apresentadas as normas com os limites de distorção permitidos.

A conversão fotovoltaica na sua forma moderna iniciou-se em 1954 quando houve o desenvolvimento de uma célula solar de silício pelos pesquisadores da *Bell Telephone* (FILHO, 2009). Após sua descoberta ela foi utilizada como principal fonte de energia elétrica em aplicações espaciais até chegar às aplicações terrestres em meados da década de 60. Inicialmente, foi utilizada para fins de telecomunicação, sistema de sinalização e proteção catódica. No início da década de 90, seus custos diminuíram, aumentando tanto o acesso como a utilização dessa tecnologia. A partir de então, houve uma inserção significativa dessa forma de geração de energia no mercado mundial. (FILHO, 2009).

A energia solar no território brasileiro tem elevado potencial para sua conversão em energia elétrica, com irradiação global média anual entre 1200 e 2400 kWh/m²/ano. Para efeito de comparação, nos países europeus que mais exploram esta fonte, como Alemanha e Espanha, os valores variam, respectivamente, nas faixas 900-1250 e 1200-1850 kWh/m²/ano. (Ministério de Minas e Energia 2013, p. 96),

Baseando-se nas normas IEC 60364 e IEC 61000 referentes, respectivamente, a instalações elétricas e compatibilidade eletromagnética, esta norma estabelece recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição de energia elétrica e estabelece seus requisitos, bem como a mesma se aplica exclusivamente aos sistemas FV que operam em paralelo com a concessionária. (ABNT NBR 16149:2013).

Os tipos de harmônicos e distorções de forma de onda informados serão conceituados a seguir, estabelecidos pelas normas da ABNT abaixo apenas informações constantes na norma, tais como a THD 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 nas Tabela 1 e Tabela 2, divididos entre as correntes de ordem ímpar e par, respectivamente.

Tabela 1 -Limite de distorção harmônica de correntes de ordens ímpares

Harmônicas	Limite de distorção
3 ^a a 9 ^a	< 4,0 %
11 ^a a 15 ^a	< 2,0 %
17 ^a a 21 ^a	< 1,5 %
23 ^a a 33 ^a	< 0,6 %

Fonte: ABNT (2013, p. 4).

Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de correntes de ordens pares

Harmônicas	Limite de distorção
2 ^a a 8 ^a	< 1,0 %
10 ^a a 32 ^a	< 0,5 %

Fonte: ABNT (2013, p. 4).

2.1 – Harmônicos

Em condições ideais, a energia que movimenta os sistemas elétricos na sua ponta seria composta por tensões puramente senoidais, com frequência e amplitude constantes. Entretanto, desvios nesse padrão se tornaram mais significativos e comuns, distorcendo a característica referencial do que deveriam ser as formas de onda, em especial nas instalações dos consumidores, sejam industriais ou comerciais. Esse advento, amplamente explorado na literatura e denominado harmônico (conteúdo de um sinal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência real do sistema), deve-se aos efeitos da proliferação das chamadas cargas não lineares, as quais provocam uma desproporcionalidade entre os sinais de corrente e tensão. Nos transformadores, é consequência da relação não linear entre o fluxo de magnetização e a corrente de excitação correspondente. (Phipps, J. K., Nelson, J. P., Sen, P. K, 1994).

Atualmente as cargas não lineares são classificadas em três categorias de acordo com a natureza da deformação:

- a) Categoria 1 – Nessa categoria encontram-se os equipamentos com característica operativa de arcos voltaicos, tais como: fornos a arco, máquinas de solda, lâmpada de descarga e outros. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade do arco voltaico.
- b) Categoria 2 – Pertencem a essa categoria os equipamentos de núcleo magnético saturado, tais como: reatores e transformadores de núcleo saturados. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade do circuito magnético.
- c) Categoria 3 – Enquadram-se aqui os equipamentos eletrônicos, tais como: inversores, retificadores, UPS, televisores, micro-ondas, computadores e outros. A natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade dos componentes eletrônicos.

A origem da distorção harmônica começa de certa forma de onda, é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação geralmente é imposto por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente como, por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outros elementos não lineares são as cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente devido ao chaveamento dos conversores. (Phipps, J. K., Nelson, J. P., Sen, P. K, 1994). Cargas que, além de serem não lineares, também variam ao longo do tempo produzem distorções variáveis no tempo, o que pode levar ao aparecimento de frequências inter-harmônicas além de harmônicas moduladas (J.A.Pomilio, S.M.Deckmann, 1997).

O grau de distorção harmônica presente na tensão e/ou corrente pode ser quantificado matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier.

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental, de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas) e de uma eventual componente contínua. (Lathi, B. P, 2007).

Portanto, um sinal de tensão periódico não senoidal pode ser expresso por:

$$v(t) = V_0 + V_{\text{máx.1}} \text{sen}(1\omega t + \varphi_1) + V_{\text{máx.2}} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{\text{máx.h}} \text{sen}(h\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

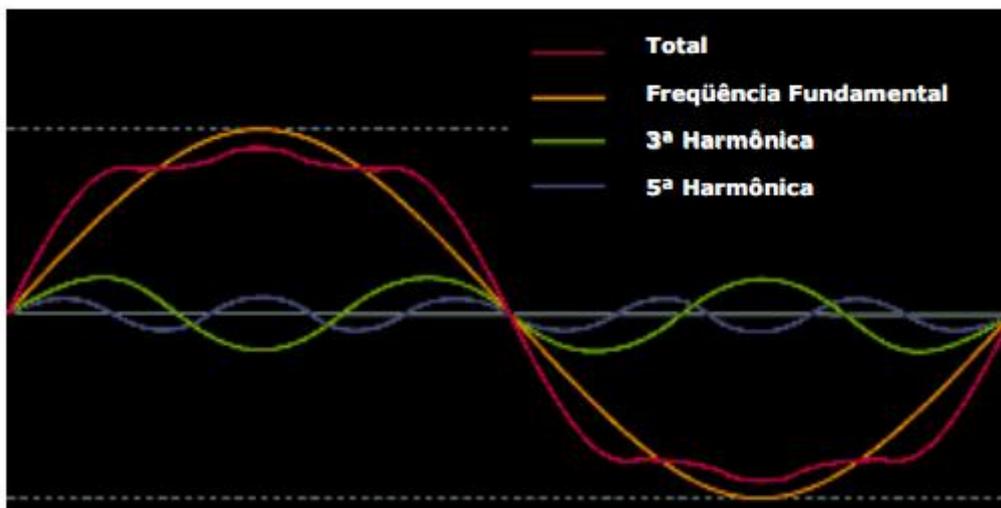
e, similarmente, para corrente:

$$i(t) = I_0 + I_{\text{máx.1}} \sin(\omega t + \varphi'_{1}) + I_{\text{máx.2}} \sin(2\omega t + \varphi'_{2}) + \dots + I_{\text{máx.h}} \sin(h\omega t + \varphi'_{n}) \quad (2)$$

onde, h (1, 2, 3, ..., n) é a ordem do harmônico.

Como exemplo, a Figura 1 apresenta a decomposição de uma forma de onda, com sua correspondente fundamental e a suas componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens.

Figura: 1 - Decomposição de uma forma de onda.



Fonte: Livro Harmônicos nas instalações elétricas, pag 44.

Nota-se que a natureza e a intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas três aspectos devem ser considerados gerais:

- É um fenômeno contínuo, ou seja, de longa duração;
- Devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas, os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentes e com maior intensidade e, por isso, geralmente são os causadores de problemas;
- Quanto maior a ordem ou frequência do harmônico menor sua intensidade.

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utilizam-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes, conforme será explanado a seguir respectivamente. (Phipps, J. K., Nelson, J. P., Sen, P. K, 1994).

2.1.1 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico

O grau com que os harmônicos podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

2.1.1.1 Motores e geradores

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal. (MICHELS, L, 2017).

Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5º, 11º, 17º, etc. harmônicos. Isto significa que tanto o 5º componente, quanto o sétimo induzem uma sexta harmônica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes.

O sobre-aquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5° e 7°, produzindo uma resultante de 6° harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas nas industriais como, por exemplo, de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

2.1.1.2 Transformadores

Segundo MICHELS, L,

“Há um aumento nas perdas, dos harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre. A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, efeito caracterizado pela repulsão entre linhas de corrente eletromagnética, criando a tendência desta fluir na superfície do condutor elétrico, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.”

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada. Além disso o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Segundo Leão (2010, pag 23) o aparecimento do terceiro harmônico gera distorções na forma de onda das tensões e correntes. Quando um transformador opera com uma densidade maior, ele exige um material com menor nível de magnetização. Conclui-se então que a corrente de magnetização irá conter além da componente fundamental todos os componentes harmônicos ímpares, sendo que desses o terceiro harmônico é o mais significativo por duas razões: pela sua amplitude, que é um terço da fundamental e pela sua frequência, que é o triplo da

fundamental. Porém, o quinto harmônico também possui sua parcela de significância, já que sua amplitude é um quinto da fundamental e sua frequência é o quádruplo da fundamental.

Harmônicos na onda de tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicos na onda da corrente aumentam as perdas no cobre. Ambas as perdas variam com a frequência, logo, quanto maior a frequência, maior a perda. Se as perdas são elevadas, o aquecimento da máquina também se eleva e a vida útil do equipamento é reduzida devido à degradação do material isolante no interior do transformador. (Leão, 2010).

2.1.1.3 Cabos de alimentação

Em razão do efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Além disso tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo. (Leão, 2010).

2.1.1.4 Capacitores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor. (MICHELS, L, 2017).

2.1.1.5 Relés de proteção e fusíveis

Um aumento da corrente eficaz devida aos harmônicos sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada. (IEEE, 2017).

Em termos dos relés de proteção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes.

A referência [IEEE] é um estudo no qual se afirma que os relés de proteção geralmente não respondem a qualquer parâmetro identificável, tais como valores eficazes da grandeza de interesse ou a amplitude de sua componente fundamental. O desempenho de um relé considerando uma faixa de frequências de entrada não é uma indicação de como aquele componente responderá a uma onda distorcida contendo aquela mesma componente espectral. Relés com múltiplas entradas são ainda mais imprevisíveis.

2.1.2 Indicadores harmônicos

Como os harmônicos (ou componentes harmônicos) causam problemas de qualidade de energia, é necessária a sua regulamentação através de normas que assegurem o nível máximo de harmônicos tolerados. Para isso é necessário que sejam utilizados indicadores para a quantificação e análise dos efeitos dos harmônicos. Nos próximos subitens são apresentados os principais indicadores de harmônicos utilizados.

Pode ser mostrado que para transformadores trifásicos, dos 3^a harmônicos nas três fases e suas múltiplas inteiras ímpares (9^a, 15^a, 21^a, ...), estão sempre em fase e é por esta razão que, em geral, o primário é conectado em delta (triângulo) de modo a prover um caminho para circulação destas componentes, que ficam “presas”, não sendo injetadas no sistema de alimentação.

No entanto, a 5^a e 7^a harmônicas da corrente de magnetização do transformador são injetadas no sistema, causando distorção de corrente e de tensão, pois tem amplitudes situadas usualmente entre 5 e 10% do valor nominal da corrente fundamental. O efeito destas harmônicas é mais acentuado bem no início da manhã (final da madrugada), quando o sistema está operando com pouca carga e a tensão é elevada. (UFSC, 2017).

A partir desta parte, será apresentado os principais indicadores harmônicos.

2.1.2.1 Distorção Harmônica Total (DHT).

O indicador é o mais utilizado para quantificar harmônicos, sendo adotado como parâmetro pelas principais referências mundiais. É importante perceber que a DHT pode ser calculada para corrente ou tensão e que a mesma não é uma informação completa, uma vez que apenas seu valor não é suficiente para quantificar a influência dos harmônicos presentes no local de medição no sistema. (UFSC, 2017).

A DHT de tensão (DHT_v):

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \quad (3)$$

e a DHT de corrente (DHT_i) são dadas por:

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \quad (4)$$

h – número inteiro (ordem harmônica)

V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h

V_1 – valor rms de tensão fundamental

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h

I_1 – valor rms de corrente fundamental

É necessário que o especialista analise o valor da DHT e o valor da magnitude da tensão ou corrente para que o mesmo avalie as distorções os efeitos dos harmônicos naquele local. Por exemplo, pode-se pensar em princípio que uma distorção harmônica de 100% encontrada na corrente de alimentação de um equipamento causaria problemas na rede, porém, se considerado que esse equipamento possui uma corrente muito baixa diante da corrente total da rede, as amplitudes dos harmônicos serão pequenas e facilmente “diluídas” pelas outras cargas ligadas ao mesmo alimentador. Porém, se o equipamento com DHT de 100% possui uma corrente alta em relação às outras cargas ligadas ao alimentador, com certeza esse conteúdo harmônico será nocivo à rede.

2.1.2.2 Distorção Total de Demanda (DTD)

Este indicador é utilizado pela recomendação IEEE 519 para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. Sua formulação matemática é bastante similar ao DHT, tendo como diferença o fato de que a DTD é calculada em relação à corrente máxima da carga e a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição. O valor da DTD é uma informação completa uma vez que sempre é calculada em relação à corrente máxima. Assim, se o valor encontrado para a DTD for alto, pode se afirmar que há elevada circulação de harmônicos naquele sistema. A DTD é dada por:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_L} \quad (5)$$

Em que,

I_L - Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema,

I_h - Valor rms da componente de corrente harmônica h .

2.2 Equipamentos Geradores de Harmônicos

No passado as distorções harmônicas nos sistemas de potência eram primordialmente associadas ao projeto e operação dos transformadores e máquinas elétricas. De fato, a principal fonte de distorções harmônicas eram as correntes de magnetização dos transformadores. Os geradores elétricos constituíam a segunda fonte de harmônicos, uma vez que aspectos práticos e econômicos de projeto requeriam que alguns desvios da forma de onda senoidal ideal fossem aceitos. Embora os transformadores e máquinas rotativas, em regime permanente e em condições normais de operação, não causem distorções significativas na rede elétrica durante condições transitórias ou quando operam fora de suas condições normais, tais equipamentos podem aumentar consideravelmente suas contribuições harmônicas. (P. k. Sheldon,).

Por outro lado, com o maior uso de equipamentos eletrônicos (retificadores a diodo, Mosfet e SCR) aumentou-se drasticamente as cargas não lineares no sistema elétrico.

Devido a isso, dentre as principais fontes geradoras de harmônicos, atualmente destacam-se os conversores estáticos de potência, inversores, constituem-se em potenciais fontes de harmônicos para os sistemas elétricos.

Inversores são dispositivos eletrônicos com objetivo de converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA) com as mesmas características de tensão, frequência, conteúdo de harmônicos, forma de onda, entre outras, da rede elétrica (RÜTHER, 2004).

Os inversores modernos utilizam chaves eletrônicas de estado sólido (dispositivos semicondutores de potência) com eficiências que podem chegar a 99%. Por meio de um sinal de controle, as chaves eletrônicas podem entrar em estado de condução ou bloqueio, permitindo a conversão de CC para CA e vice-versa. Os principais tipos de dispositivos utilizados em inversores são o *Silicon Controlled Rectifier* (SCR), *Triode of Alternating Current* (TRIAC), *Gate Turn-off Thyristor* (GTO), *Bipolar Junction Transistor* (BJT), *Metal Oxide Semi conductor Field Effect Transistor* (MOSFET) e *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) (PINHO; GALDINO, 2014).

Para um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), os inversores são divididos em comutados pela rede e auto comutados, sendo que os autocomutados são geralmente utilizados para sistemas de menor potência. Esses equipamentos também se diferenciam pelo número de estágios de conversão e opção de utilização ou não de transformadores. Em relação à conexão com a rede elétrica, podem operar no modo de fonte de corrente (CSI) ou fonte de tensão (VSI). (PUFAL, 2012).

2.3 - QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

QEE é o termo para Qualidade de Energia Elétrica refere-se a uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a corrente e a tensão em um dado instante e posição em um sistema elétrico (IEEE, 2009). Essa variedade de fenômenos eletromagnéticos pode ser classificada em variações no valor eficaz de curta duração e de longa duração, variações de frequência e distorções na forma de onda e os transitórios. É necessário realizar os ensaios de Qualidade de Energia Elétrica para avaliar a conformidade do inversor com os padrões da rede elétrica brasileira, no que diz respeito ao fator de potência, distorção harmônica total e injeção de componente contínua.

Outro aspecto importante da qualidade da energia elétrica é o seu efeito na eficiência energética. Permitir que o sistema elétrico tenha um alto conteúdo harmônico caracteriza baixa qualidade da energia e provoca perdas adicionais na distribuição dessa energia. A circulação de harmônicos provoca perdas por efeito Joule nos condutores, transformadores e outros equipamentos. (MAX MAY, 2010 UFSC).

As agências reguladoras de energia elétrica são as responsáveis por definir os indicadores que determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em termos de qualidade da energia. A preocupação dos órgãos reguladores é a qualidade do produto, ou seja, da forma de onda, da sua amplitude ou distorção e, também, com a qualidade do serviço, ou seja, o número de interrupções de energia e sua duração. (MAX MAY, 2010 UFSC).

2.4 – PRODIST

Nas informações obtidas sobre o que é encontrado no manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, abaixo uma transcrição do mesmo:

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia em regime especial vinculada ao ministério das Minas e Energia. Foi criada em 1997, com a finalidade de regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do decreto nº 2.335/1997.

As atribuições da ANEEL são regular a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, fiscalizar as concessões, permissões e os serviços de energia elétrica, implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos, estabelecer tarifas, promover as atividades relativas às outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica e mediar, na esfera administrativa, os conflitos entre os agentes e os consumidores de energia elétrica.

O PRODIST (procedimentos de distribuição) é um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL para normalizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao desempenho e ao funcionamento dos sistemas de distribuição de

energia elétrica. É composto por nove módulos, apresentados na tabela a seguir (PRODIST).

Tabela 3 - conteúdo dos módulos do PRODIST

Módulo	Assunto tratado
1	Introdução
2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
3	Acesso ao Sistema de Distribuição
4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
5	Sistemas de Medição
6	Informações Requeridas e Obrigações
7	Cálculo de Perdas na Distribuição
8	Qualidade da Energia Elétrica
9	Ressarcimento de Danos Elétricos

Fonte: PRODIST

Neste trabalho foi apenas analisado o módulo 8 do PRODIST, que trata da área de qualidade da energia elétrica, definindo termos e limites toleráveis relativos à qualidade do produto ofertado pela usina megawatt solar da empresa Eletrosul S.A.. O módulo estabelece, tratando-se da qualidade do serviço, a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais.

O PRODIST estabelece os indicadores DRP (Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária) e DRC (Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica), que são obtidos através de 1008 leituras válidas consecutivas (168 horas) das tensões em intervalos de 10 minutos, os quais não podem ultrapassar o limite de 3% e 0,5% respectivamente.

Conforme Prodíst Módulo 8, para conexão superior a 1 kV e inferior à 69 kV, considera-se:

- Tensão Precária, maior ou igual a 0,90 pu e menor que 0,93 pu.
- Tensão Crítica, menor que 0,90 pu e maior que 1,05 pu.
- Tensão Adequada, maior ou igual que 0,93 pu e menor ou igual que 1,05 pu.

Ainda dentro das normas estabelecidas no PRODÍST encontramos:

O PRODÍST tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço. Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracterizados fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Para a qualidade do fornecimento de energia elétrica, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Sua Abrangência tem como os procedimentos de qualidade da energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por:

- a) consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) centrais geradoras;
- c) distribuidoras;
- d) agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Os procedimentos de qualidade da energia elétrica definidos neste módulo se aplicam aos atendimentos realizados por Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI e Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI, exceto o que estiver disposto em Resolução específica.

As centrais geradoras que se conectam às Demais Instalações de Transmissão – DIT ou às instalações sob responsabilidade de distribuidora em nível de tensão superior a 69 kV ou

celebram Contrato de Uso do Sistema de Transmissão – CUST devem também observar o disposto nos Procedimentos de Rede. (Aneel, 2017).

Ainda dentro do PRODISC, encontramos:

O objetivo principal é tratar os seguintes fenômenos da qualidade do produto em regime permanente ou transitório:

a) Permanente

- i. tensão em regime permanente;
- ii. fator de potência;
- iii. harmônicos;
- iv. desequilíbrio de tensão;
- v. flutuação de tensão;
- vi. variação de frequência.

b) Transitório

- i. variações de tensão de curta duração - VTCD;

Além de definir os fenômenos da qualidade do produto, estabelecendo os seus indicadores e o seus valores de referência ou limites, estabelece aspectos relacionados à instrumentação e à metodologia de medição dos fenômenos da qualidade do produto, definindo procedimentos para a gestão das reclamações dos acessantes sobre problemas relacionados à qualidade do produto e descrevendo os estudos sobre a qualidade do produto para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

Na 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 de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores. A tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição, devendo a distribuidora dotar-se de recursos e técnicas modernas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados, conforme definições desta Seção. (ANEEL, 2017).

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV deve situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão e, ainda, coincidir com a tensão nominal de um dos terminais de derivação previamente exigido ou recomendado para o transformador da unidade consumidora poderá

ser contratada tensão intermediária entre os terminais de derivação padronizados, desde que em comum acordo entre as partes, e a tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão igual ou inferior a 1 kV deve ser a tensão nominal do sistema.

Com relação à regulação das tensões de atendimento:

- a) a tensão de atendimento, para as tensões contratadas devem ser classificadas de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura, conforme procedimentos de Rede ou contemplada no Acordo Operativo a ser firmado entre os agentes;
- b) as tensões de atendimento referidas na alínea devem ser classificadas de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura;
- c) as tensões de atendimento referidas devem ser classificadas de acordo com as faixas de variação da tensão de leitura.

Ainda conforme informações encontradas no PRODIST:

Os acessantes da Rede Básica deverão ter as faixas de tensão classificadas de acordo com os Procedimentos de Rede ou em observância aos valores estipulados em regulamentação. O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas conforme no intuito de se obter 1008 (mil e oito) leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente. Os indicadores individuais mensais de todos os acessantes com medição permanente devem ser armazenados por no mínimo 5 (cinco) anos, para efeito de fiscalização da ANEEL. (PRODIST, 2017).

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, quando de medições oriundas por reclamação ou amostrais, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP):

$$DRP = \frac{nlp}{1008} * 100[\%] \quad (6)$$

e o para tensão crítica (DRC) de acordo com as seguintes expressões:

$$DRC = \frac{nlc}{1008} * 100[\%] \quad (7)$$

sendo :

nlp representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precárias;

nlc representa o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas críticas. (PRODIST, 2017).

Os indicadores DRP e DRC serão associados a um mês civil.

Ainda segundo o PRODIST:

Para os acessantes com medição permanente, será observado o seguinte procedimento conforme o PRODIST:

- a) cada conjunto de 1008 leituras válidas compõe um indicador DRP e um DRC;
- b) são considerados todos os conjuntos de 1008 leituras válidas cujo período de apuração tenha sido encerrado no respectivo mês civil;
- c) os valores de DRP e DRC a serem considerados para o mês civil correspondem à média dos valores calculados dentre todos os conjuntos de 1008 leituras válidas.

Para as medições eventuais ou amostrais, o mês civil de referência da medição de tensão

será aquele no qual se deu o término da medição de 168 horas.

Para acessantes da Rede Básica, os indicadores DRP e DRC deverão ser calculados de acordo com os critérios estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

Com base nas medições amostrais efetuadas, será calculado o Índice de Unidades Consumidoras com Tensão Crítica (ICC), utilizando a seguinte fórmula:

$$ICC = \frac{N_c}{N_L} * 100[\%] \quad (8)$$

em que:

N_c = total de unidades consumidoras com DRC, não nulo; e

N_L = total de unidades consumidoras objeto de medição.

O fator de desequilíbrio de tensão (FD) é calculado pela relação entre as magnitudes de tensão de sequência negativa e positiva:

$$FD\% = \frac{-V}{+V} * 100[\%] \quad (9)$$

Sendo:

Fator de desequilíbrio de tensão FD

V- Magnitude da tensão eficaz de seqüência negativa – frequência fundamental

V+ Magnitude da tensão eficaz de seqüência positiva – frequência fundamental

Vab, Vbc e Vca Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental

Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas FD95%

CAPÍTULO 3 Informações sobre o projeto Megawatt Solar da Eletrosul

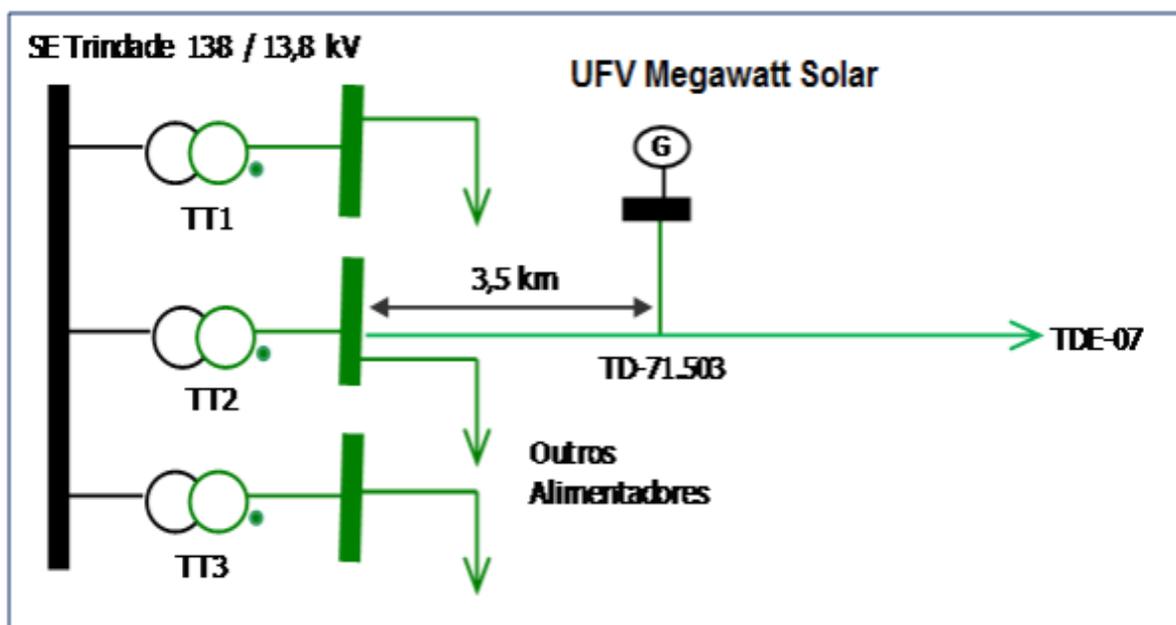
No Capítulo 3 são apresentadas informações sobre o projeto Megawatt Solar da Eletrosul, correspondente a uma usina fotovoltaica pertencente à empresa. A usina solar tem capacidade instalada de aproximadamente 1 MWp e está integrada ao edifício sede da ELETROSUL em Florianópolis – SC, utilizando a área do telhado e dos estacionamentos adjacentes. O sistema é conectado à rede da CELESC.

3.1 - Usina Megawatt Solar Eletrosul

A usina solar tem capacidade instalada de aproximadamente 1 MWp e está integrada ao edifício sede da ELETROSUL em Florianópolis – SC, utilizando a área do telhado e dos estacionamentos adjacentes.

. A Usina Fotovoltaica tem capacidade instalada de 1015,28 kWp (930kW). A usina está conectada na rede de distribuição da Concessionária CELESC, via tronco do Alimentador TDE-07 da SE 138/13,8 kV Trindade (TT2), distante aproximadamente 3,5 km dessa subestação, próximo ao transformador de distribuição da Eletrosul nº 71503, conforme ilustrado no diagrama a seguir.

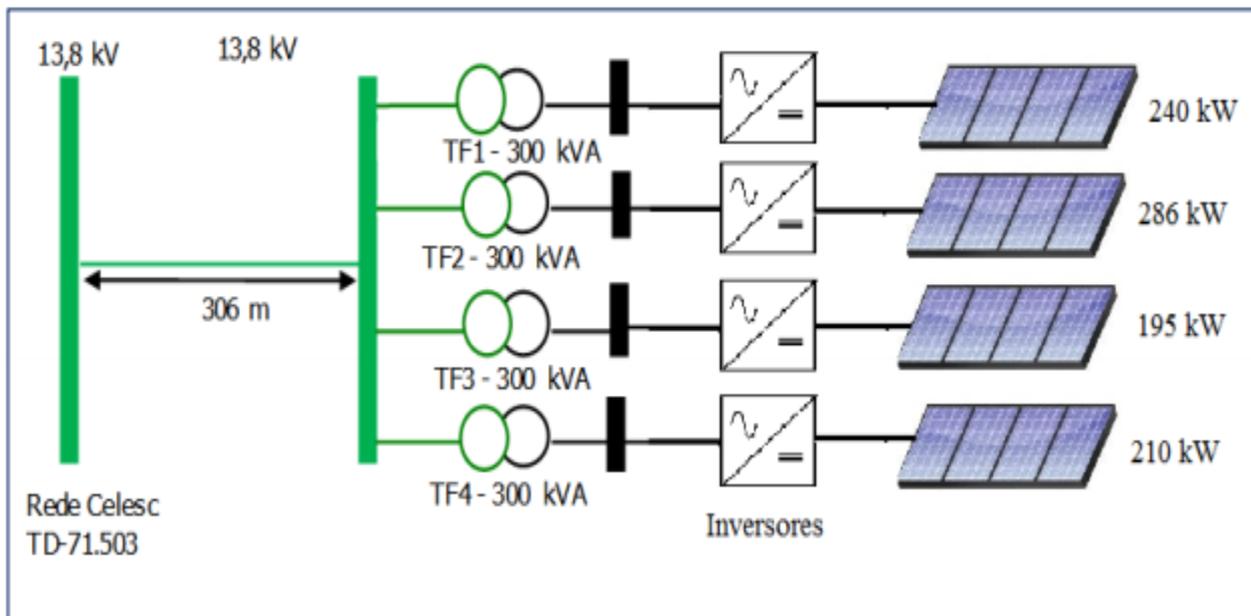
Figura 2: Distância usina da subestação Celesc Trindade



Fonte: própria do autor.

A usina está dividida em 4 grupos de geração, conectados no 13,8 kV através de 4 transformadores 13800/380 V, conforme apresentado na figura:

Figura 3 Divisão dos grupos de geração – Configuração da UFV Megawatt Solar



Fonte: própria do autor.

O sistema fotovoltaico (FV) é subdividido em:

- 4 sistemas instalados no telhado da edificação denominados por: NE1, NE2, NW1 e NW2;
- 9 sistemas em forma de coberturas de estacionamentos denominados por: B1, B2, C2, C3, C4, C5, C6, C7 e F1.

No total, os sistemas que compõem o telhado são constituídos por 3.836 módulos fotovoltaicos Bosch de 245 Wp, totalizando 939,82 kWp de potência CC, conectados a 68 inversores trifásicos Schneider Conext TL 15000 de 15 kWp.

Quadro das especificações técnicas do inversor Conext™ TL 15000:

Especificação	Valor
Tensão máxima do sistema fotovoltaico	1000 V
Corrente máxima por string	23 A
Faixa de tensão CC de operação do MPPT	350 – 800 V
Faixa de tensão CC de operação por string	200 – 800 V
Tensão CA nominal de operação (padrão de fábrica)	230/400 V

Frequência nominal de operação (padrão de fábrica)	60 Hz
Máxima corrente CA no inversor	24 A

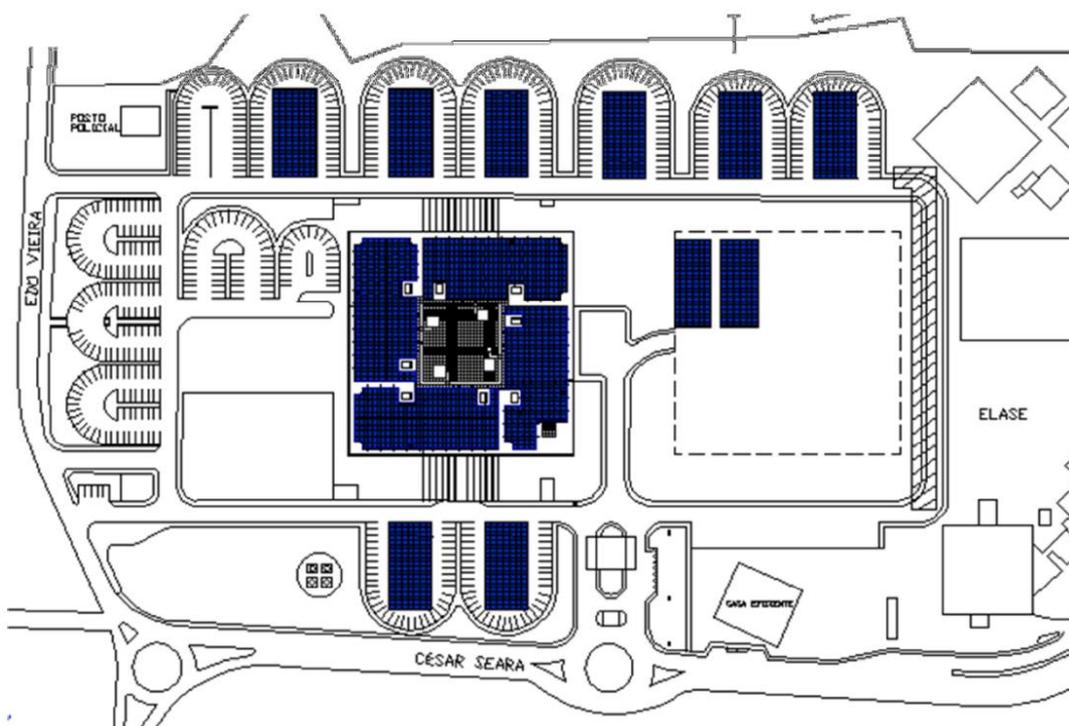
Fonte: Autor

Foto 1 - Imagem da distribuição das placas fotovoltaicas no prédio e garagens.



Fonte – Acervo Eletrosul

Figura 2 - Layout dos módulos FV integrados a edificação e seus estacionamentos.



Fonte – Acervo Eletrosul

A figura 3 mostra dados de placa de um modulo FV da Bosch. Dados importantes como: tensão e corrente nominais de funcionamento (normalizados para condições de STC), fusível recomendado (Max. Series Fuse), tensão e corrente em circuito aberto (Open Circuit Voltage e short circuit Current), tensão máxima do sistema (Max. System Voltage) além das condições em que foram realizados os testes para obtenção desses valores: AM 1.5, 25°C e 1000 W/m2.

Figura 4 – Exemplo de dados de placa de modulo fotovoltaico.



Fonte: Acervo técnico Eletrosul

Tabela 4: Resumo dos sistemas de distribuição das células fotovoltaicas no telhado do prédio

Eletrocentros	CT2		CT3		
Sistemas	NE1	NW2	NE2	NW1	Total
Quantidade de módulos	476	476	408	476	1836
Potência FV instalada (kWp)	116,62	116,62	99,96	116,62	449,82
Nº de inversores	7	7	6	7	27
Potência AC instalada (kWp)	105	105	90	105	405
Nº de módulos por string	17	17	17	17	-
Nº de strings p/ inversor	4	4	4	4	-
Carregamento dos inversores	1,11	1,11	1,11	1,11	-

Fonte: Próprio Autor

Tabela 5: Resumo dos sistemas dos estacionamentos

Eletrocentros										
Sistemas	B1	B2	C2	C3	C4	C5	C6	C7	F1	Total
Quantidade de módulos	250	250	272	272	272	272	272	272	250	2382
Potência FV instalada (kWp)	61,25	61,25	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	66,64	61,25	583,59
Nº de inversores	4	4	4	4	4	4	4	4	4	36
Potência AC instalada (kWp)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	540
Nº de módulos por string	17/23	17/23	17	17	17	17	17	17	17/23	-
Nº de strings p/ inversor	4/2	4/2	4	4	4	4	4	4	4/2	-
Carregamento dos inversores	1,11/0,75	1,11/0,75	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11/0,75	-

Fonte: Próprio Autor

Os inversores e caixas de junção dos sistemas FV do telhado estão instalados nos CT2 e CT3. E em cada CT ha um quadro elétrico intermediário que conecta a saída dos inversores a um transformador de media tensão.

Nos estacionamentos, os inversores e caixas de junção encontram-se instalados na estrutura metálica dos sistemas. Cada estacionamento tem seu quadro elétrico intermediário.

3.2 - Inversor Conext™ TL 15000

O inversor é o equipamento responsável por converter a energia em corrente continua dos painéis em corrente alternada nas características da rede elétrica, no caso do Brasil, 60Hz e 380/220 V ou 220/127 V. Além disso, ele faz com que seja aproveitada ao máximo a potencia fornecida pelos painéis através do buscador de máxima potencia, que faz com que o gerador FV esteja sempre operando no seu ponto de máxima potencia.

Cada inversor possui dois buscadores de máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking), que podem operar tanto no modo independente ou no modo paralelo. No modo paralelo eles funcionam como se fossem apenas um único MPPT e todo gerador FV opera no mesmo ponto de tensão e corrente. No modo independente, e possível separar o gerador FV em dois subsistemas, de forma que eles possam operar em níveis de tensão e corrente diferentes. Isso pode ser útil, por exemplo, em uma instalação sobre um telhado onde diferentes setores do telhado possuam diferentes orientações e ou inclinações e portanto estariam recebendo níveis diferentes de irradiância ao longo do dia. Nesse caso, utilizar um MPPT para cada conjunto de módulos pode aumentar o rendimento do sistema como um

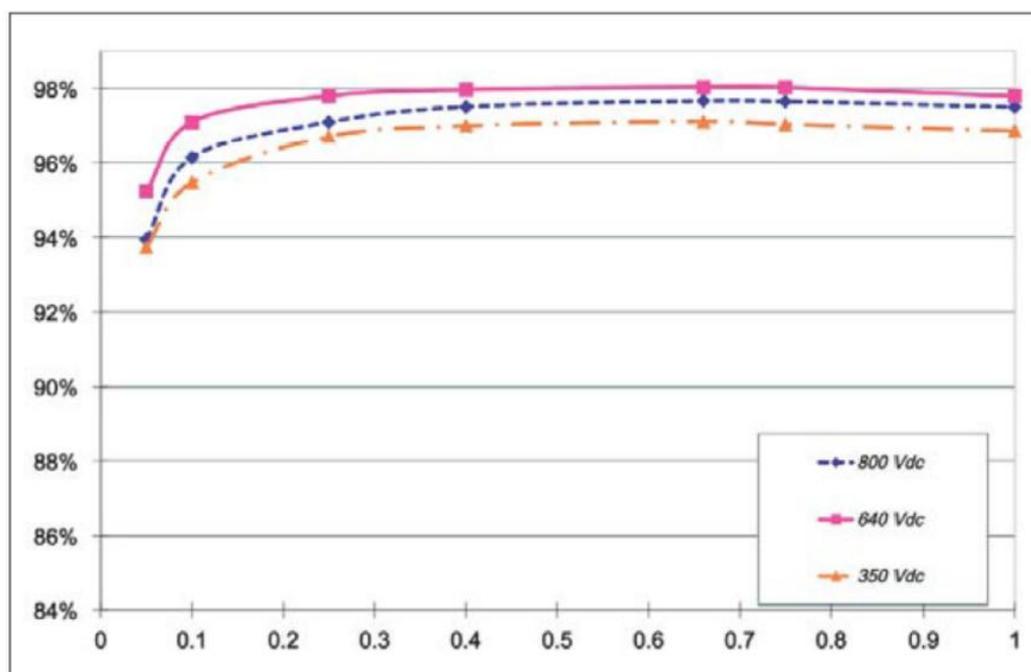
todo. Segundo testes realizados com este inversor, o uso do modo MPPT independente possui perdas de eficiência muito pequenas em relação a operação no modo paralelo.

Os inversores utilizados no sistema FV são inversores Conext TL 15000 E da Schneider Eletric.

Este modelo de inversor não possui transformador isolador e nem a opção de aterramento de um dos polos dos módulos FV devido ao tipo de tecnologia dos módulos (mono cristalino) não precisarem destes quesitos.

Na Figura temos três curvas de eficiência, para diferentes níveis de tensão DC, em função da potencia de saída. Analisando as curvas, vemos que o inversor atinge seu pico de eficiência para tensão de entrada 640 V e potencia de saída entre 30% e 80%.

Figura 5 – Curvas de eficiência do inversor Conext TL 15000 E em função do carregamento e tensão de operação.



Fonte: manual inversor da Schneider Eletric

Os inversores, antes de se conectarem com a rede elétrica, realizam um teste de resistência de isolamento automaticamente. Os inversores do sistema fotovoltaico do MEGAWATT estão programados para serem acionados somente quando a resistência de isolamento for superior a 1,2 MΩ.

4 – CAPÍTULO Medições de qualidade de energia na UFV Megawatt Solar

O objetivo das medições realizadas na UFV para este trabalho de TCC, foi verificar a qualidade de energia da usina, avaliando os resultados de fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio e flutuação. As medições foram realizadas entre os dias 25/07 à 08/08 de 2017.

4.1 Equipamentos utilizados

Nas medições de qualidade de energia realizadas foi utilizado o equipamento G4430 BLACKBOX PQA, fabricado pela Elspec, de propriedade da empresa Eletrosul S.A.. Este medidor é do tipo classe A, segundo a IEC 61000-4-30 e é homologado pelo ONS e indicado pela CELESC. A figura 3 mostra uma foto do equipamento utilizado.

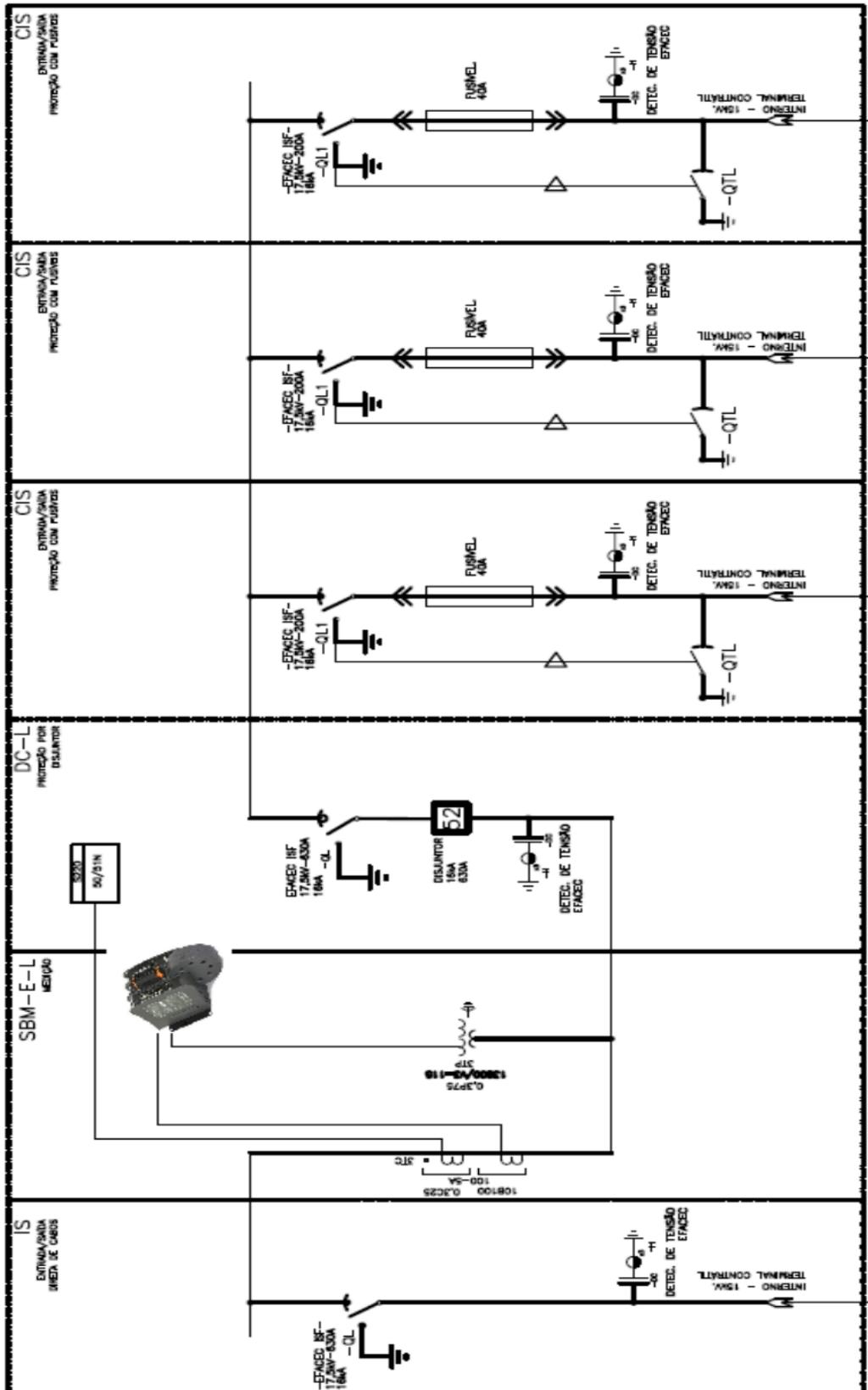
Figura 3 – Equipamento G4430 BLACKBOX PQA



Fonte: Autor

O equipamento foi instalado no painel de proteção e medição da usina, realizando medições de corrente e tensão dos secundários dos TCs e TPs de medição, localizados na saída da usina. As relações dos enrolamentos dos TCs e TPs utilizados são 100/5 e $13800\sqrt{3}/115$, respectivamente, com classes de exatidão 0,3.

Cubículo de proteção e medição Eletrosul CT1



Fonte: autor

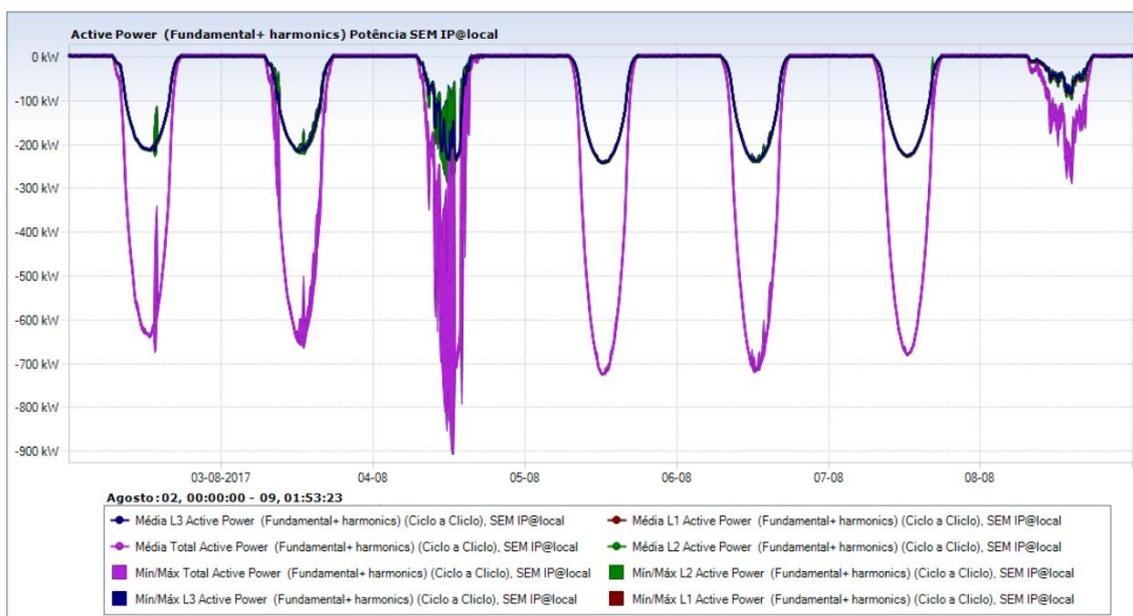
4.2 - Resultados das Medições

A análise e os resultados das medições de qualidade de energia foram baseados no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, elaborado pela ANEEL. Adicionalmente, por solicitação da Celesc são apresentados os resultados de medição de potência ativa e reativa, corrente e harmônicos de corrente.

4.3 - Medições de Qualidade de Energia com a UFV Megawatt Solar operando

As medições com a mesma operando foram realizadas entre os dias 02 e 08 de agosto. Na figura 12 são apresentados os gráficos de potência ativa da planta solar. Observa-se um comportamento típico de uma usina fotovoltaica, com geração entre 7 horas da manhã e 6 horas da tarde e picos de geração entre 12 e 13 horas. Durante os 7 dias de medição ocorreram 5 dias com geração solar sem grandes variações (céu sem nuvens), 1 dia com grande variação de geração (céu com algumas núvens) e 1 dia com pouca geração (ceú nublado). O pico de geração verificado foi de 907,7 kWp.

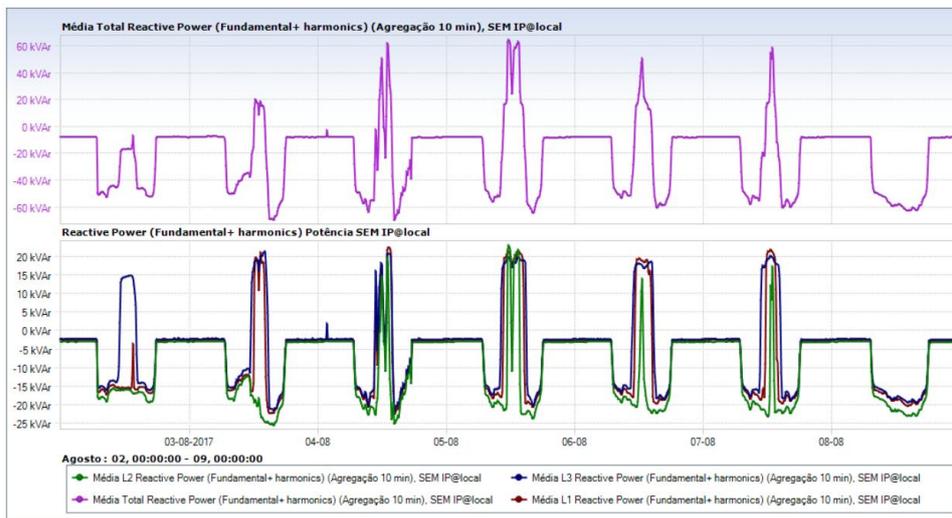
Figura 12 – Potência Ativa medida no ponto de conexão da usina



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

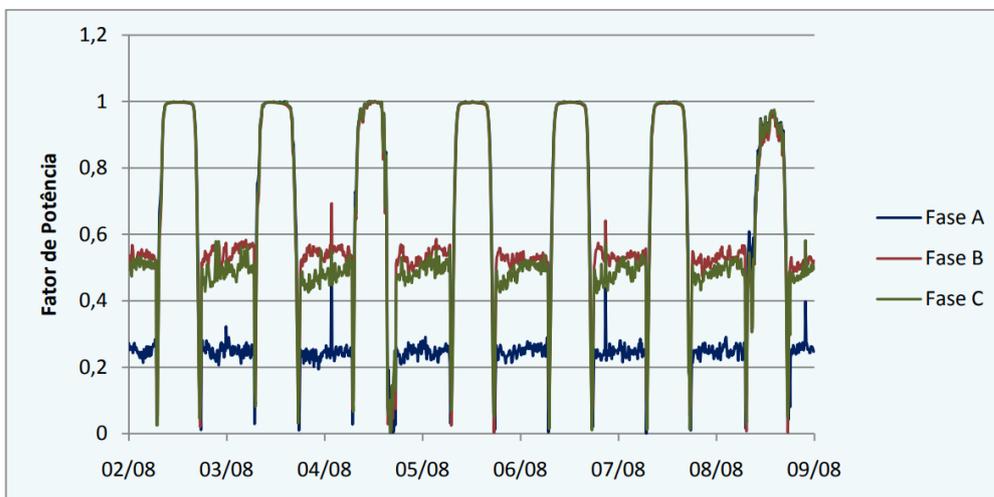
A figura 13 apresenta o gráfico da potência reativa medida no ponto de conexão da planta solar. Os inversores estão ajustados para manter fator de potência próximo a 1. Quando não há radiação solar os inversores automaticamente se desconectam da rede. Neste caso, a potência reativa injetada na rede é muito pequena, em torno de 7 kVAr, pelo fato dos transformadores e cabos ficarem a vazia na rede. Quando a radiação solar aumenta os inversores são conectados e junto com eles os filtros passivos necessários para filtragem das harmônicas provocadas pelo chaveamento dos inversores. Neste momento, a potência reativa injetada na rede aumenta, chegando a valores próximos a 60 kVAr. Quando inicia a geração de potência ativa, os inversores buscam manter o fator de potência em 1, como pode ser visto na figura 13.

Figura 13 – Potência Reativa medida no ponto de conexão da usina



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 14 – Fator de Potência medido no ponto de conexão da usina

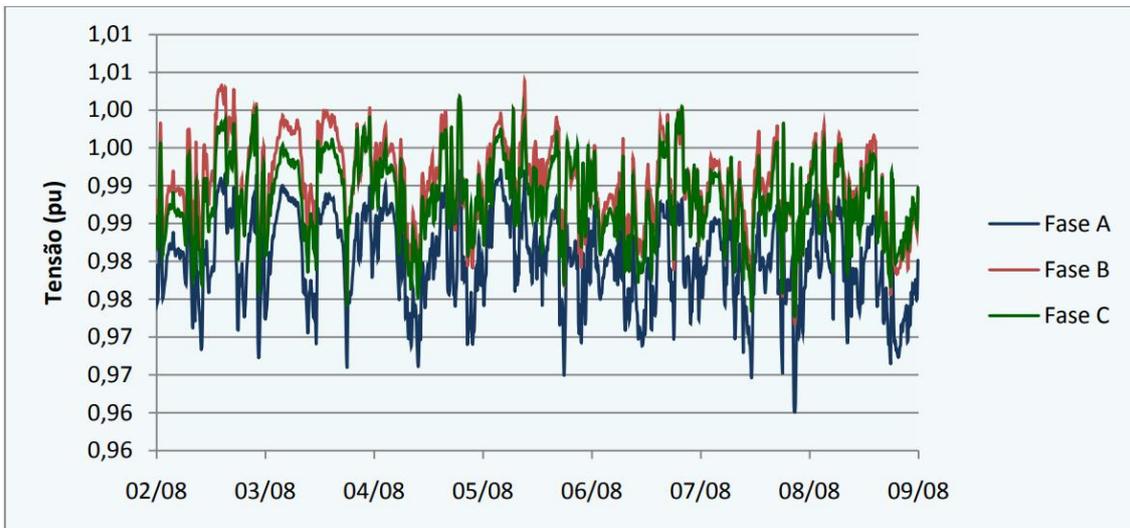


Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

4.1.1 Tensão em regime permanente

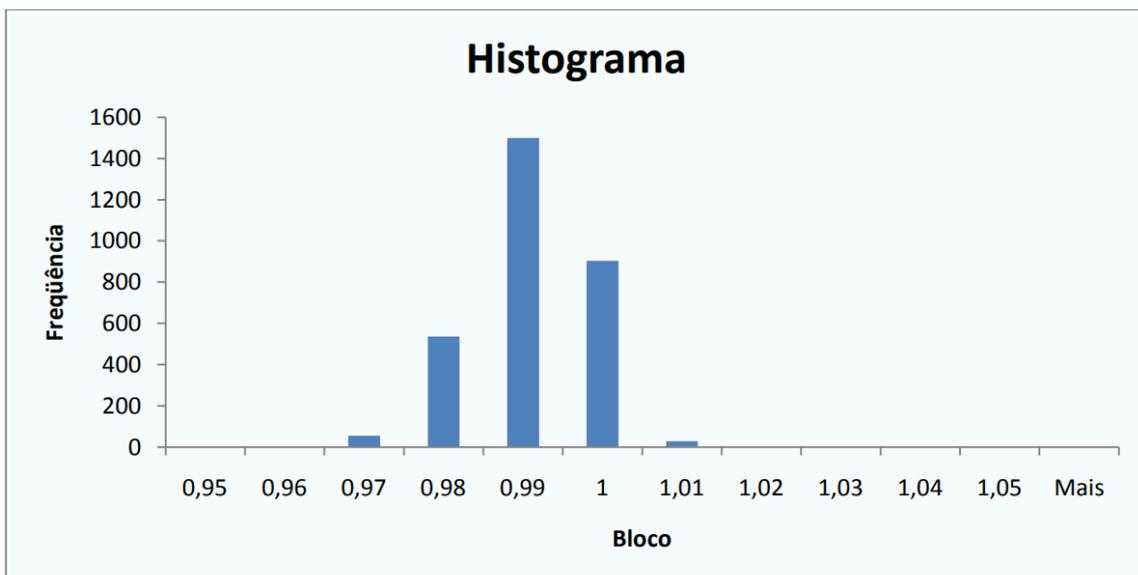
Neste item são apresentados os resultados de tensão em regime permanente com a UFV Megawatt Solar operando. A maior parte dos valores ficou entre 0,98 e 1pu, conforme apresentado nas figuras 15 e 16. Não ocorreu violação da faixa de tensão entre 0,95 e 1,05 pu.

Figura 15 – Tensão em regime permanente com a UFV Megawatt Solar



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

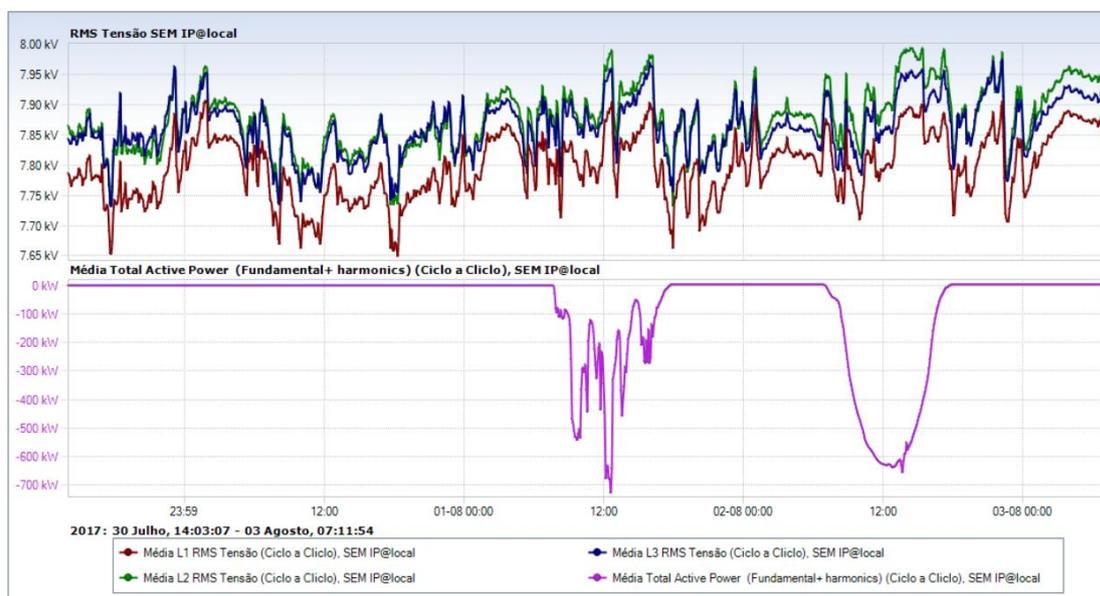
Figura 16 – Histograma Tensão com a UFV Megawatt Solar



Fonte: Autor

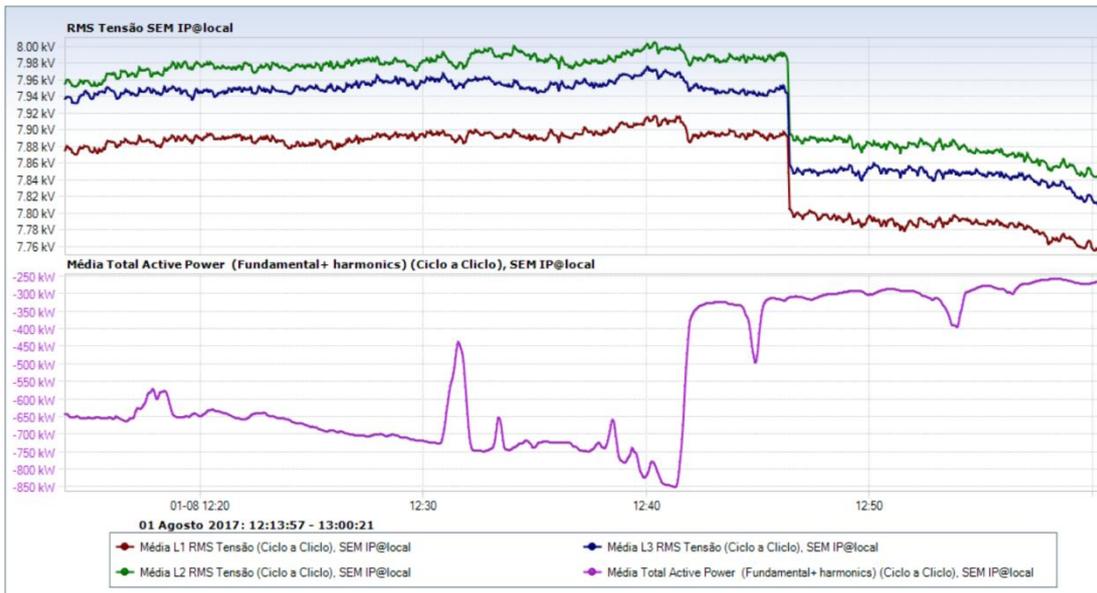
As figuras 17 e 18 apresentam um detalhamento do comportamento da tensão no dia que apresentou maior variação de geração de potência ativa devido a ocorrências de sombreamento. É possível observar que as rápidas variações de potência ativa não provocam variação significativa na tensão do ponto de conexão. O PRODIST estabelece os indicadores DRP (Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária) e DRC (Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica), que são obtidos através de 1008 leituras válidas consecutivas (168 horas) das tensões em intervalos de 10 minutos, os quais não podem ultrapassarem o limite de 3% e 0,5% respectivamente. Conforme Prodist Módulo 8, para conexão superior a 1 kV e inferior à 69 kV, considera-se: - Tensão Precária, maior ou igual a 0,90 pu e menor que 0,93 pu. - Tensão Crítica, menor que 0,90 pu e maior que 1,05 pu. - Tensão Adequada, maior ou igual que 0,93 pu e menor ou igual que 1,05 pu. Nas medições realizadas com a UFV Megawatt Solar desligada, os valores de tensão, conforme histograma apresentada na figura 6, ficaram entre 0,97 e 1,01 pu. Sendo assim, os indicadores DRP e DRC são iguais a zero e estão em conformidade com o PRODIST.

Figura 17 – Detalhe da tensão em regime permanente no dia com grande variação de geração



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 18 – Detalhe da tensão em regime permanente no dia com grande variação de geração



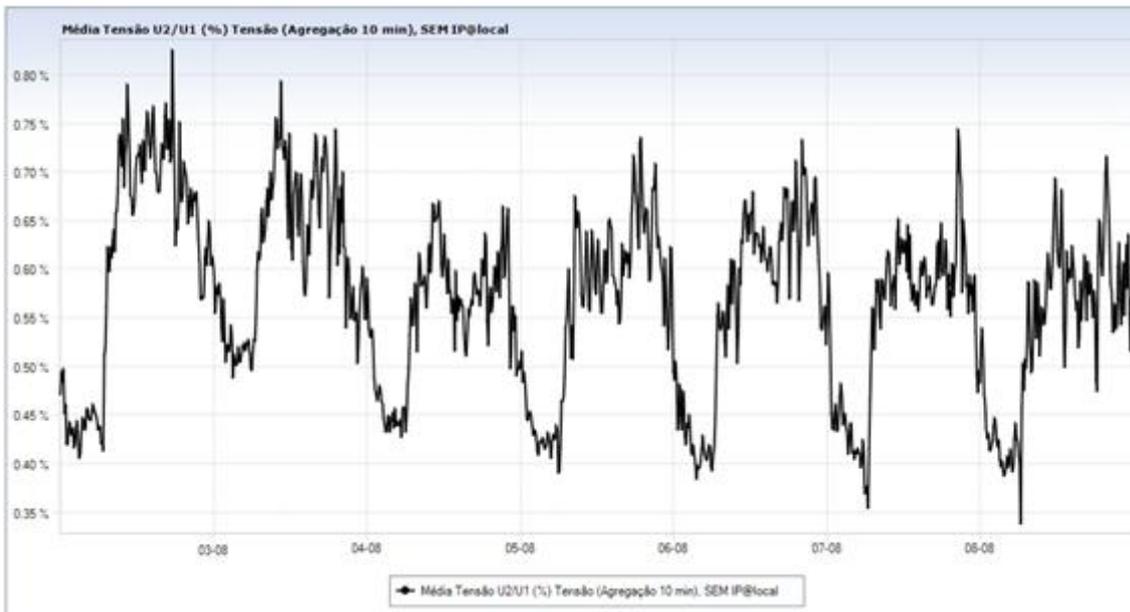
Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

4.1.2 Desequilíbrio de Tensão

Neste item são apresentados os resultados de desequilíbrio de tensão medidos com a UFV Megawatt Solar operando. O fator de desequilíbrio de tensão (FD) é calculado pela relação entre as magnitudes de tensão de sequência negativa e positiva:

Os valores de desequilíbrio de tensão apresentado na figura 19 estão bem abaixo dos limites do PRODIST, e apresenta a comparação do desequilíbrio de tensão com e sem a UFV Megawatt Solar, onde verifica-se que a operação da usina traz pouca influência para o desequilíbrio de tensão no ponto monitorado.

Figura 19 – Desequilíbrio de Tensão medido com a UFV Megawatt Solar

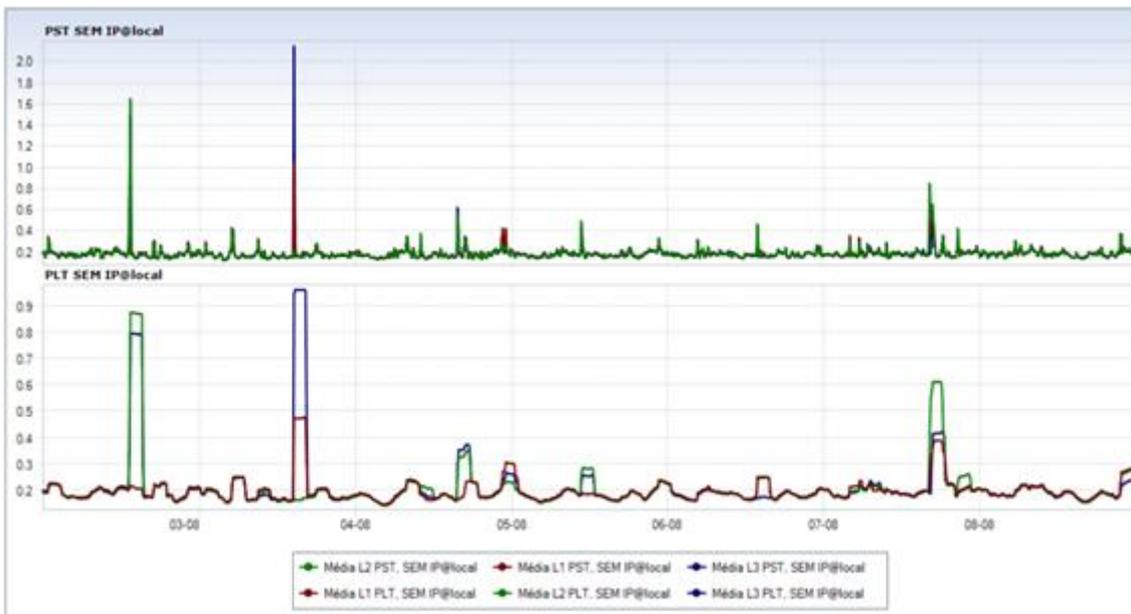


Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

4.1.3 Flutuação de Tensão (flicker)

A figura 20 mostra o gráfico dos valores de flutuação (PST e PLT) medidos com a UFV Megawatt Solar. As tabelas 6 e 7 apresentam os indicadores PstD95% e PltS95%. Os indicadores PstD95% estão todos abaixo dos limites de referência do PRODIST. O PltS95% apresenta uma pequena violação dos limites nos dias 02, 03 e 07 de agosto. Essa violação foi causada por 3 valores espúrios. Na maior parte do tempo, os valores estão muito abaixo dos limites de referência. A figura 21 apresenta a comparação entre os valores de PST95% calculados com e sem a operação da UFV Megawatt Solar. A operação da UFV Megawatt Solar não influencia nos valores de flutuação de tensão.

Figura 20 – Flutuação de tensão com a UFV Megawatt Solar



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Tabela 6 – Flutuação de Tensão (Pst95%) com a UFV Megawatt Solar

	Pst95%							Pst95%
	02/ago	03/ago	04/ago	05/ago	06/ago	07/ago	08/ago	
Fase A	0,27	0,22	0,26	0,23	0,24	0,30	0,25	0,30
Fase B	0,27	0,22	0,27	0,23	0,24	0,32	0,25	0,32
Fase C	0,26	0,26	0,22	0,26	0,23	0,23	0,24	0,29

Fonte: Autor

Tabela 7 – Flutuação de Tensão (Plt95%) com a UFV Megawatt Solar

	PltS95%							PltS95%
	02/ago	03/ago	04/ago	05/ago	06/ago	07/ago	08/ago	
Fase A	0,22	0,47	0,27	0,23	0,25	0,38	0,27	0,47
Fase B	0,87	0,24	0,32	0,28	0,25	0,61	0,26	0,87
Fase C	0,79	0,96	0,35	0,25	0,20	0,41	0,23	0,96

Fonte: Autor

4.1.4 Variação de Tensão de Curta Duração

Durante o período monitorado ocorreram 3 eventos de VTCD, apresentados na tabela 8. Todos os eventos estão classificados como afundamento momentâneo de tensão e não estão relacionados com a operação da UFV Megawatt Solar. A planta solar não saiu de operação durante os afundamentos de tensão, conforme mostrado na figura 24. O controle do inversor durante o afundamento de tensão controla a corrente para manter a potência ativa constante.

Tabela 8 – Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)

ID	Evento	Fase	Severidade	Tempo de inicio	Duração	Valor	Unidades	Desvio
222	Afundamento de Tensão	2,3	56	02/08/2017 13:23:19.777	00:00:00.0833259	6931.5	Volt	12.98828%
223	Afundamento de Tensão	3	60	03/08/2017 14:32:35.204	00:00:00.0417313	6765.5	Volt	15.03906%
224	Afundamento de Tensão	2	55	07/08/2017 16:16:41.746	00:00:00.0084309	6943.5	Volt	12.8418%

Fonte: Autor

Figura 21 – Ocorrência de afundamento de tensão

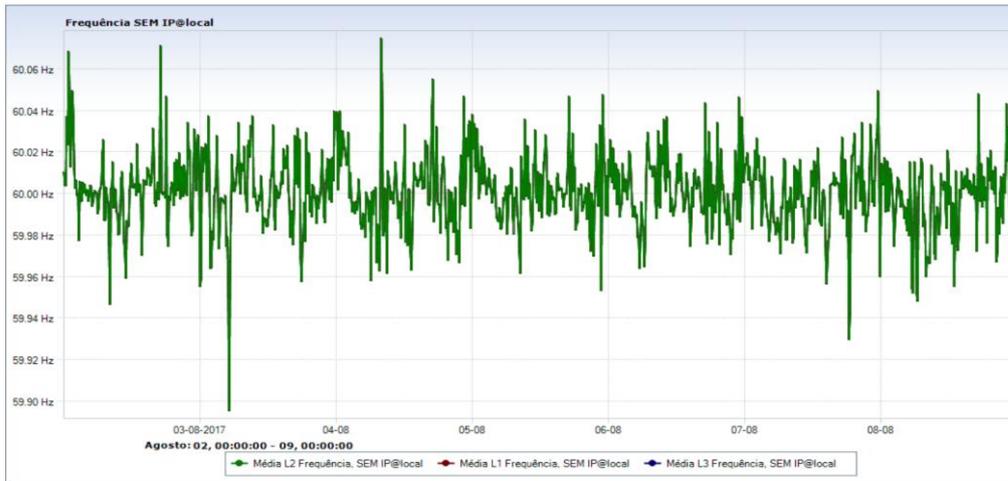


Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

4.1.5 Variação de Frequência

Durante o período monitorado, não houve variação significativa de frequência. No dia 03/08 às 05:03 ocorreu um pequeno desvio de frequência, chegando a 59,88 Hz. Neste momento não havia geração na UFV Megawatt Solar.

Figura 22 – Variação da frequência com a UFV Megawatt Solar operando

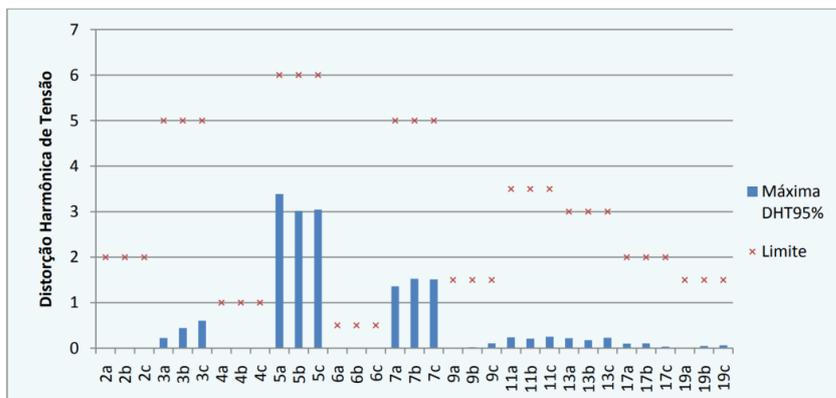


Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

4.1.6 Distorção Harmônica

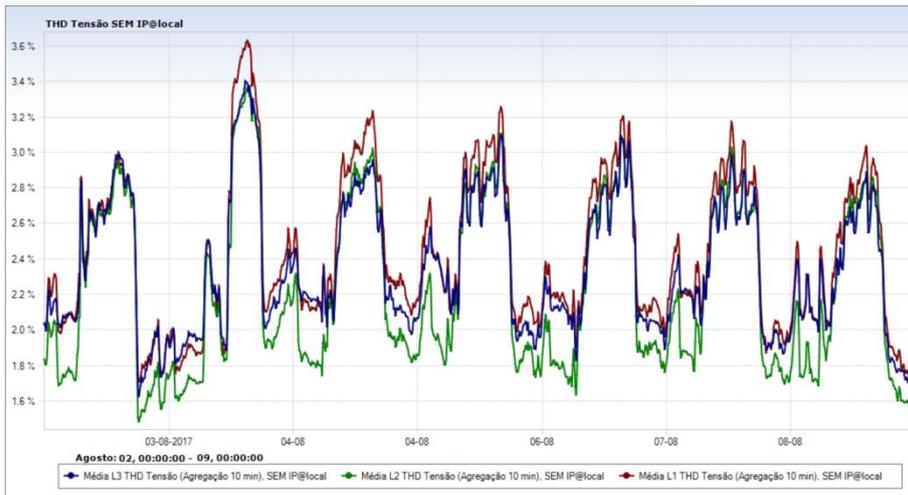
Na figura 23 são apresentados os resultados de medição das distorções de tensão DHT95% dos harmônicos que apresentaram valores não-nulos. Os valores de distorção de tensão medidos com ou sem a operação da CGS Megawatt Solar estão abaixo dos limites do PRODIST, sendo que a usina fotovoltaica não influencia significativamente na distorção de tensão medida no ponto de conexão, conforme apresentado na figura 24. Na figura 25 são apresentados os valores de distorção harmônica de total da tensão. É possível observar que a distorção total acompanha o comportamento da carga. Os valores estão muito abaixo do limite do PRODIST (8%).

Figura 23 – Distorção Harmônica de Tensão (DHT95%)



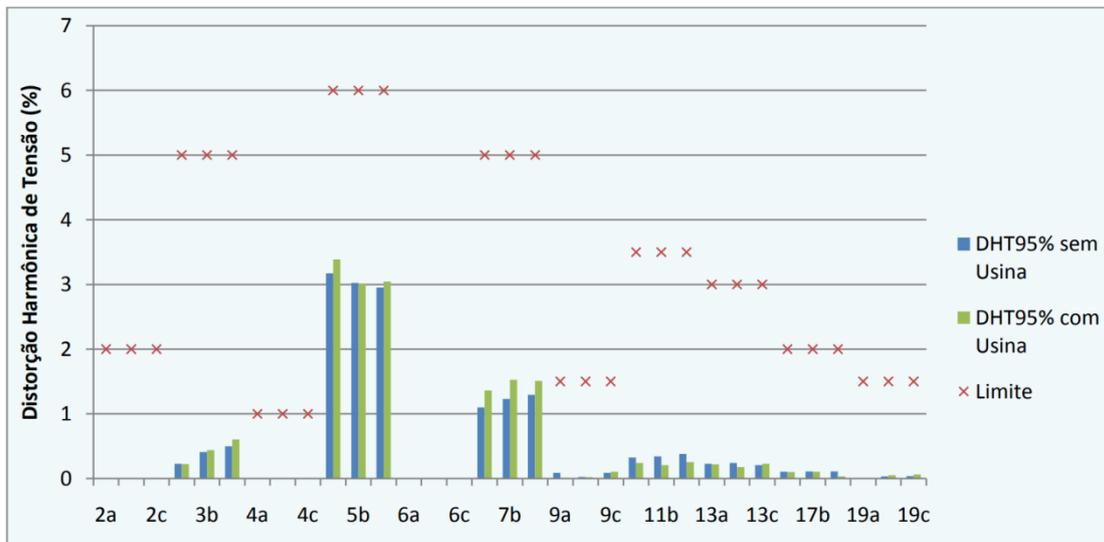
Fonte: Autor

Figura 24 – Distorção Harmônica de Tensão Total com a UFV Megawatt Solar operando



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 25 – Comparação distorção de tensão DHT95% com e sem a UFV Megawatt Solar



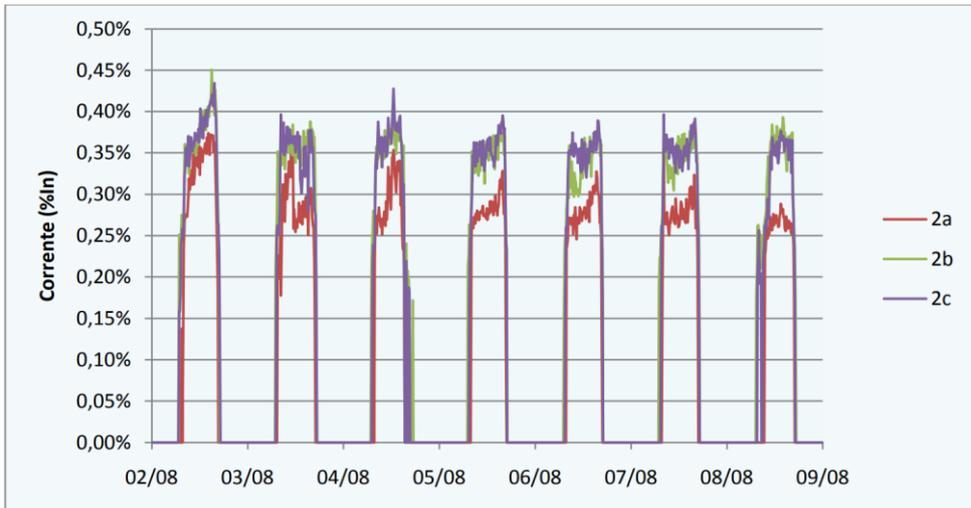
Fonte: Autor

4.1.7 Harmônicos de Corrente

Neste item são apresentados os resultados das medições de corrente harmônica realizadas na saída da usina fotovoltaica. Foram calculados valores em porcentagem da corrente nominal da usina (38,95 Arms), média de 10 min. Nos gráficos abaixo estão apresentados as correntes de harmônicos de ordem 2,3,5,7,9,11 e 13. As demais ordens de harmônicos apresentaram valores nulos de corrente. As correntes de harmônicos medidas apresentaram valores baixos,

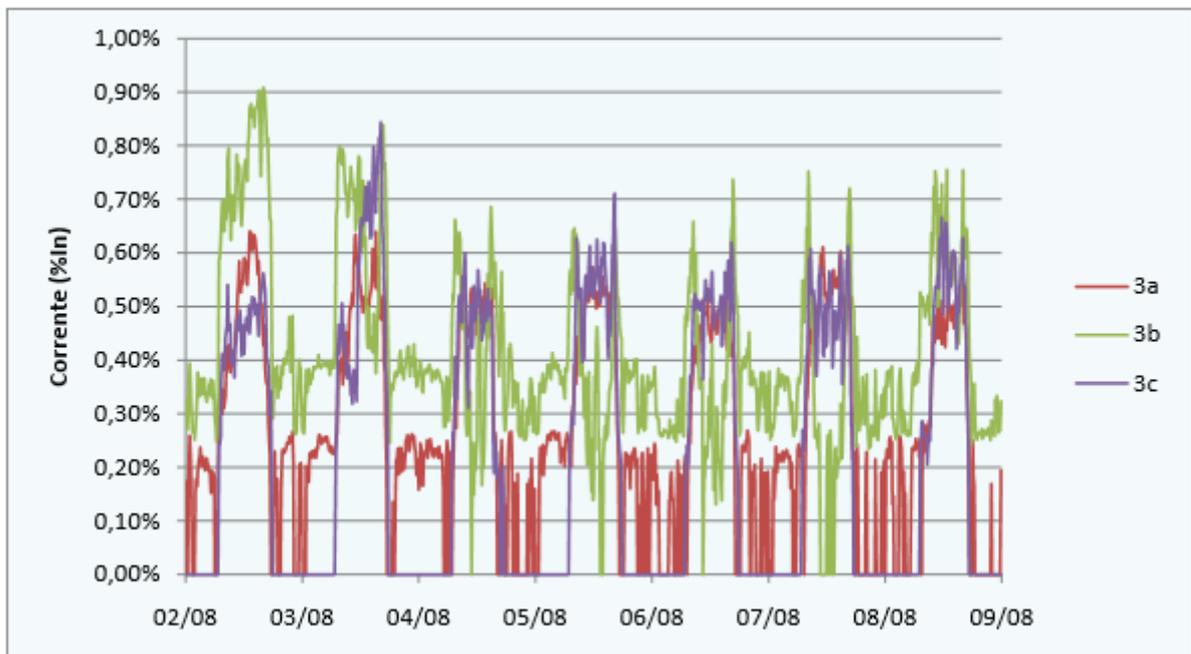
sendo que a de 5º harmônico apresentou valores um pouco mais elevados e será analisada com mais detalhe.

Figura 26 – Correntes de 2º harmônico medida na saída da UFV Megawatt Solar operando



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

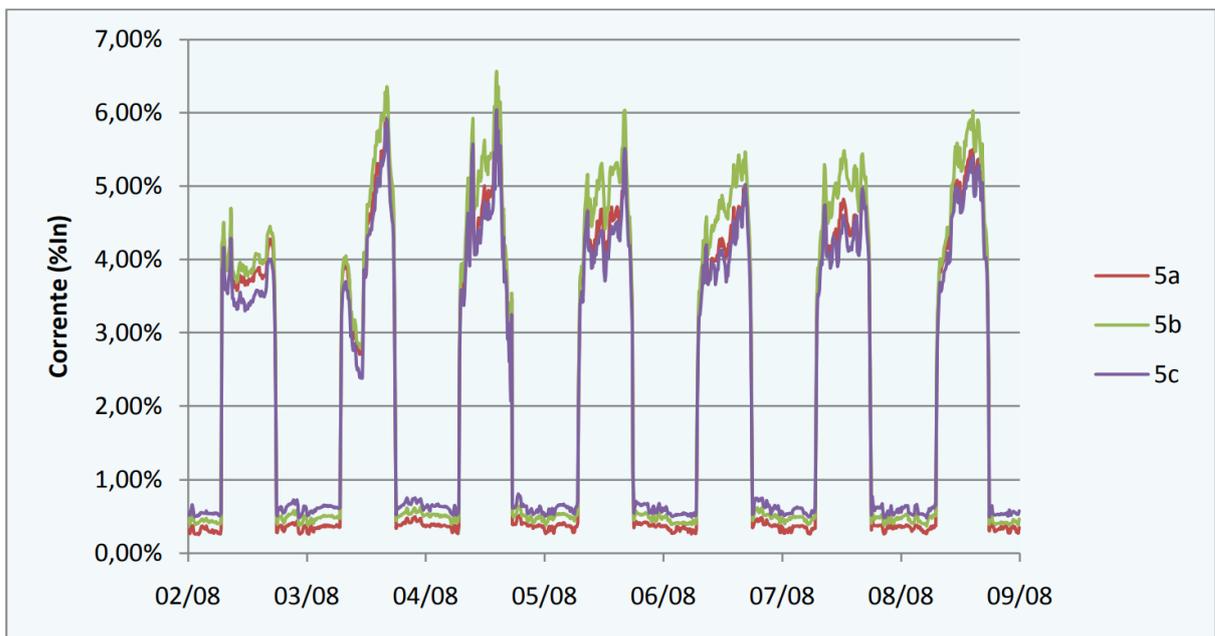
Figura 27 – Correntes de 3º harmônico medida na saída da UFV Megawatt Solar operando



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

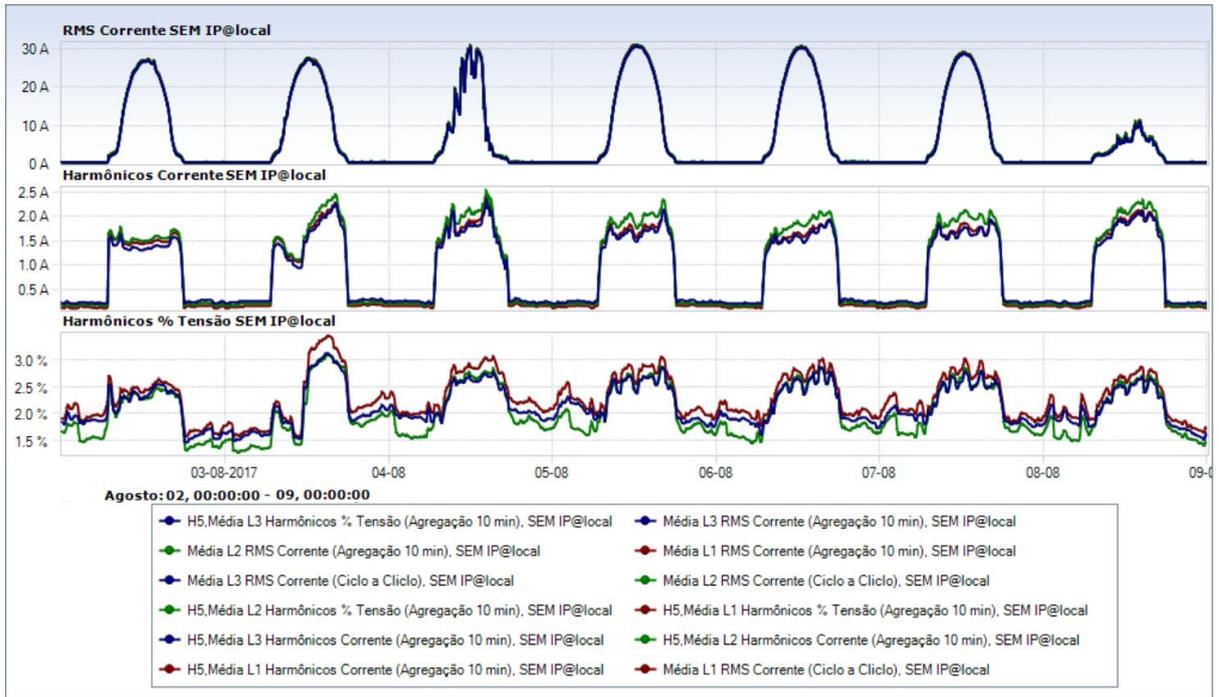
As correntes de 5^o harmônico são influenciadas pela distorção de tensão presente na rede. Isso pode ser verificado na figura 28, que apresenta o comportamento do 5^o harmônico. Durante a noite, quando não há radiação solar, os inversores ficam desconectados da rede, mesmo assim há uma circulação de corrente harmônica devido à impedância interna da usina (cabos e transformador). Quando o inversor é conectado à rede, imediatamente há um aumento significativo e imediato de corrente de 5^o harmônico, mesmo sem geração de potência ativa. Isso ocorre devido à resposta em frequência dos filtros passivos dos inversores mais impedância interna da usina, que leva à drenagem de corrente de 5^o harmônico presente na rede. No dia 08/08 a geração da usina fotovoltaica foi muito mais baixa devido às condições climáticas. Entretanto, as correntes de 5^o harmônica medida apresentaram valores próximos aos valores medidos nos outros dias em que a usina estava com a geração máxima.

Figura 28 – Correntes de 5^o harmônica medida na saída da UFV Megawatt Solar operando



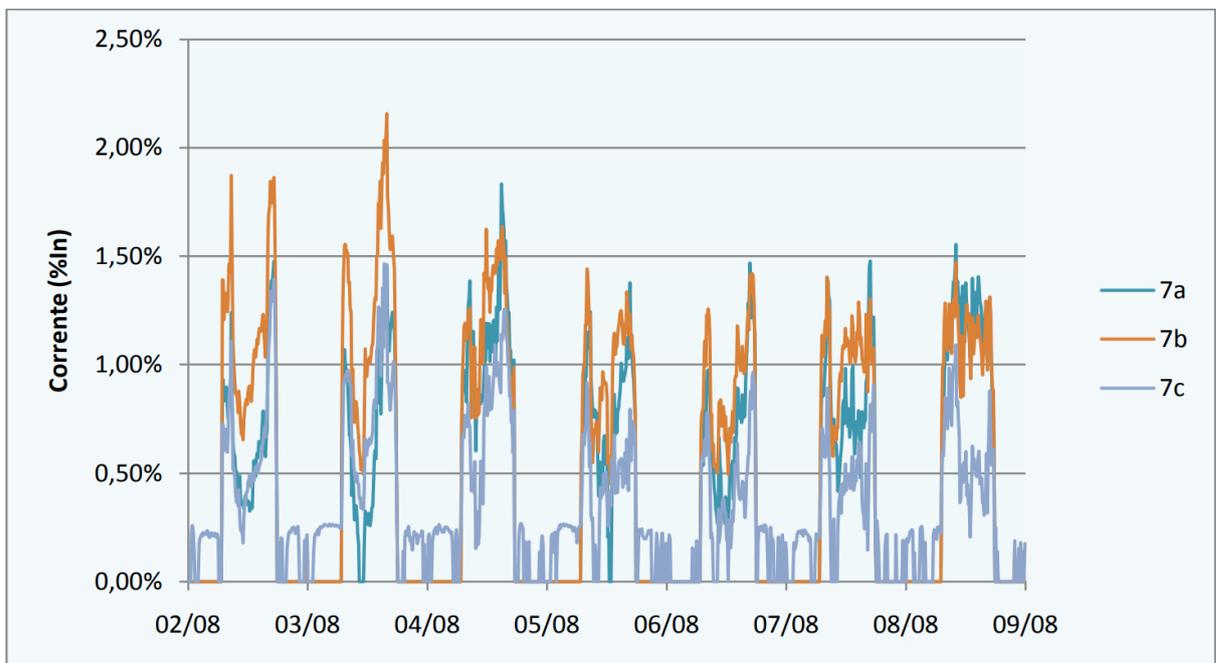
Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 29 – Correntes de 5º harmônico medidas na saída da UFV Megawatt Solar operando



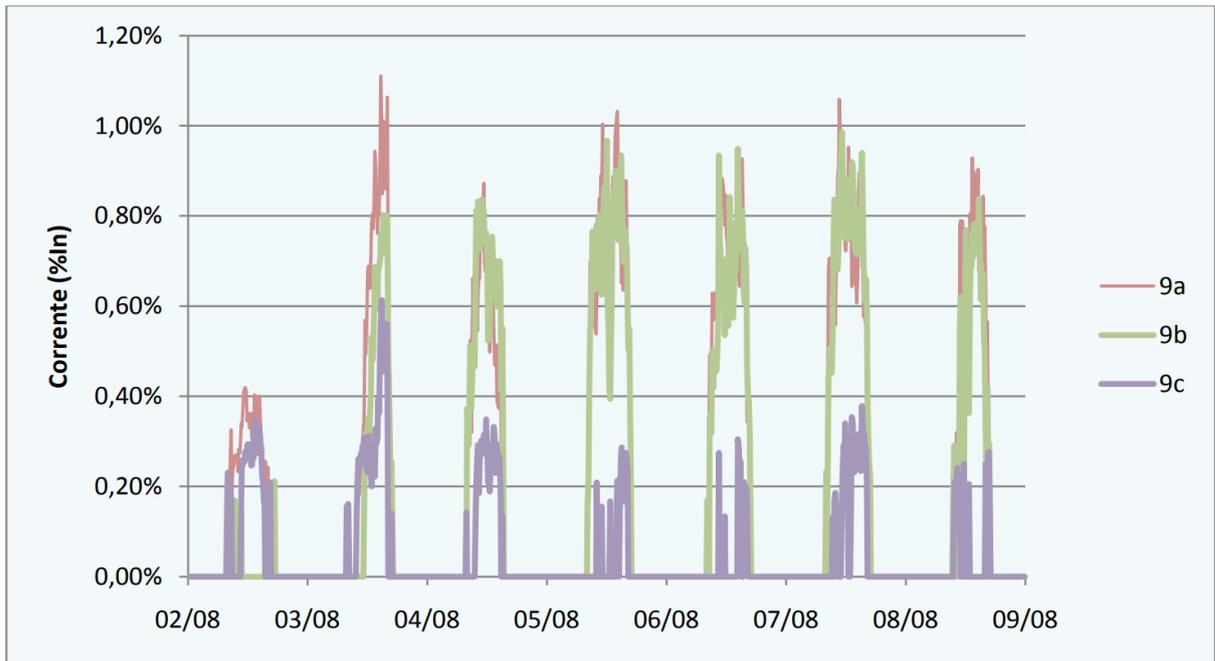
Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 30 – Correntes de 7º harmônico medidas na saída da UFV Megawatt Solar operando



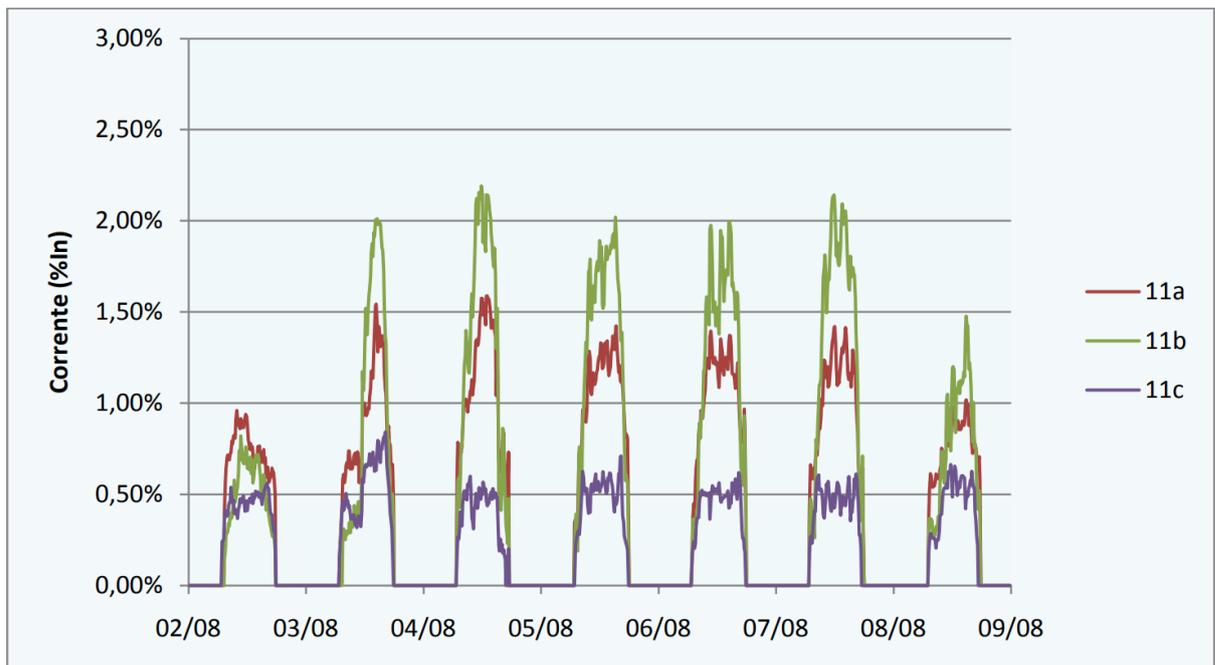
Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 31 – Correntes de 9º harmônico medidas na saída da UFV Megawatt Solar operando



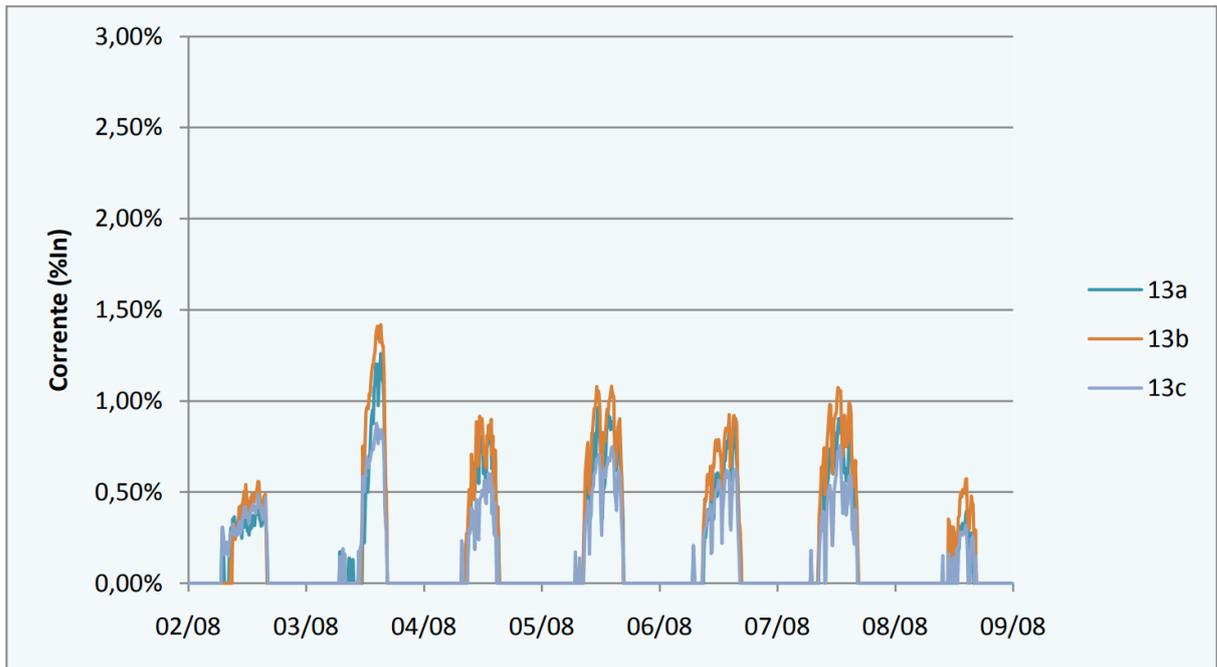
Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 32 – Correntes de 11º harmônico medidas na saída da UFV Megawatt Solar operando



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

Figura 33 – Correntes de 13º harmônico medidas na saída da UFV Megawatt Solar operando



Fonte: Programa PQSCADA da Elspec

5- CONCLUSÃO

Foram realizadas campanhas de medição de qualidade de energia entre os dias 25/07 a 09/08 para avaliar na influência da UFV Megawatt Solar. Os resultados de medição mostraram que os indicadores de desequilíbrio de tensão KD95 ficaram bem abaixo do valor de limite estabelecido pelo PRODIST (2%) durante as semanas avaliadas. Além disso, verificou-se que a operação da UFV Megawatt Solar não traz nenhuma influência significativa no desequilíbrio de tensão. Os indicadores de flutuação de tensão PstD95% ficaram abaixo dos valores de limite estabelecidos pelo PRODIST nas semanas avaliadas. Os indicadores de PltD95% apresentaram alguns valores acima do limite devido a algumas medições espúrios de Pst, porém, excluindo-se essas medições espúrias, os valores de Plt estiveram muito abaixo do limite do PRODIST. A operação da UFV Megawatt Solar não traz nenhuma influência significativa nesses indicadores. Os valores dos indicadores de distorção harmônica DHT95% de todas as fases apresentaram-se bem abaixo do limite estabelecido pelo PRODIST para os níveis de tensão avaliados. A operação da Megawatt Solar não traz influência significativa para os níveis de distorção de tensão.

A análise dos resultados mostra que os harmônicos atuais gerados pelos sistemas fotovoltaico depende muito do nível de geração. Como tal, as condições em que a irradiância solar é baixa ou reduzida pelos efeitos de sombreamento ou as nuvens passageiras levam a um aumento da distorção harmônica. No entanto, esta maior Distorção harmônica não é prejudicial quando o valor RMS associado da corrente é relativamente baixo. Em geral, em nível de alta geração, a distorção harmônica é relativamente baixa (<5%), e o controle do inversor opera de tal forma que no caso analisado, o sistema fotovoltaico fornece uma contribuição positiva para a redução da distorção nas tensões da rede da concessionária.

Com base nos resultados de medição da qualidade de tensão, conclui-se que a operação da UFV Megawatt segue os padrões e limites estabelecidos e não traz nenhuma influência significativa nos indicadores de qualidade de energia.

O desenvolvimento desta trabalho propiciou grande envolvimento no projeto mega watt solar, buscando fundamentação e desenvolvimento no assunto de harmônicas em rede on grid, além de aprofundar o conhecimento no universo da energia fotovoltaica, alavancando grande expectativa em relação a esta fonte alternativa e cada vez mais promissora na matriz energética brasileira.

Para trabalhos futuros, e ampliar o conhecimento a outras plantas fotovoltaicas instaladas a rede, pode-se usar como por exemplo de futuro estudo a instalação da Universidade do Sul do Estado de Santa Catarina, Unisul, localizada no bairro Pedra Branca na cidade da Palhoça – SC, que poderá embasar com mais dados e subsídios, para aceitação da energia fotovoltaica em grande escala e na qualidade de energia em redes on grid.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 16149. Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, RJ, 2013. Acesso 04 de abril de 2017.

ANA, hidroweb.ana.gov.br/cd2/livro.doc, Acesso 28 de março de 2017.

ANEEL. PRODIST – Procedimentos de Distribuição de energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

BLUESOL, <http://blog.bluesol.com.br/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-on-grid/> Acesso 16 de maio 2017.

D. A. Koppicar et al., Circulating-current loss in transformer windings, IEE Proc.-Sci Meas. Technol. Vol. 145, N° 4, July 1998, pp. 136-140.

IEEE, https://www.ieee.org/about/news/2009/2009_news_index.html. Acesso 27 abril de 2017.

J.A.Pomilio, S.M.Deckmann. "Efeito Flicker produzido pela Modulação Harmônica". SBQEE'97 - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica, Nov. 1997, São Lourenço, MG.

Eletrosul - <<http://eletrosul.gov.br/home/>. Acesso 21 de maio 2017

Ministério de Minas e Energia, 2013, Brasília Plano Decenal de Expansão de Energia – 2022. Disponível em <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2014/PDE2022.pdf>. Acesso em 24 de abril de 2017.

LATHI - Lathi, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. 2ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2007.

LEÃO, R. P. S. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. Fortaleza/ Ceará: UFC/ Departamento de Engenharia Elétrica - Centro de Tecnologia, 2010. 160p.

MICHELS, L. Estudo Dirigido – Transformadores Monofásicos. Santa Catarina/ SC: UDESC/Departamento de Engenharia Elétrica. s/data. Disponível em:
http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/michels/materiais/EPO1___Estudo_digitido___Transformadores.pdf Acesso em: 12 mai. 2017.

ONS, . (ONS, nt 009/2016 - instruções para realização de estudos e medições de qee relacionados aos novos acessos à rede básica para parques eólicos, solares e consumidores livres). , <http://www.ons.org.br/home/>. Acesso 22 de maio 2017

O SETOR ELÉTRICO, <http://www.oseletrico.com.br/>. Acesso 23 de março 2017
ONS, <http://www.ons.org.br/home/>. Acesso 22 de maio 2017

Phipps, J. K., Nelson, J. P., Sen, P. K. (1994): “Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March/April 1994, pp. 476-485

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CRESESB, 2014. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>
Acesso em 10 de maio. de 2017.

P. k. Sheldon, C. L. Ivey, “Application, design and rating of transformer containing harmonic currents,” in Conf. Rec. 1990 IEEE Pulp, Paper Ind. Tech. Conf., pp. 19-31.

PUFAL, Ricardo Augusto. Modelagem de cargas não lineares e rede de energia elétrica para simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/60994>>. Acesso em 16 de maio. de 2017.

RÜTHER, Ricardo. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

SILVA, Luiz Carlos Evangelista da. Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa. 2008. 202f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/posgraduacao/232-dissertacao_luiz_evangelista.pdf>. Acesso em 27 de março. de 2017.

SOUZA, Márcio Eli de. Inserção de micro geração distribuída nas redes de baixa tensão: implantação de telhados solares – Estudo de caso real. 2014. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1117M.PDF>>. Acesso em 18 de março. de 2017.

TCCMaxMay, https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/165083/TCC_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso 22 de março 2017 UFSC, <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handlehttp://inep.sites.ufsc.br/livros/> Acesso 25 de maio de 2017.

UFSC, Curso Harmônicas, UFSC INEP, 64 pag, 2015. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handlehttp://inep.sites.ufsc.br/livros/> Acesso 25 de maio de 2017.