

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Tiago Elias Castelo de Oliveira

**Estudo da Capacidade de Hospedagem de
Fontes de Geração Distribuída no Sistema
Elétrico de um Campus Universitário**

Itajubá-MG, 21 de Agosto de 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Tiago Elias Castelo de Oliveira

**Estudo da Capacidade de Hospedagem de
Fontes de Geração Distribuída no Sistema
Elétrico de um Campus Universitário**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. PhD. Paulo Fernando Ribeiro

Co-orientador: Prof. Ph.D. Benedito Donizeti Bonatto

Itajubá-MG, 21 de Agosto de 2015.



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I
FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Título da Dissertação: **“Estudo da capacidade de hospedagem de fontes de geração distribuída no sistema elétrico de um campus universitário”**

Autor: **Tiago Elias Castelo de Oliveira**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito A = Aprovado - R = Reprovado - I = Insuficiente	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	
4º	A	

Observações:

- (1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- (2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- (3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Este documento terá a validade de 60 (sessenta) dias a contar da data da defesa da Dissertação.

Resultado Final: Conceito: A, ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 21 de agosto de 2015.

Prof. Dr. Ronaldo Rossi
1º Examinador - UNESP/GUA

Prof. Dr. Fernando Nunes Belchior
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. Benedito Donizeti Bonatto
3º Examinador (Coorientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Paulo Fernando Ribeiro
4º Examinador (Orientador) - UNIFEI

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Benedito e Valerie.

“A maior ambição que um homem pode ter é ser feliz.”

Prof. Antônio Eduardo Hermeto

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela vida, saúde, força, coragem e perseverança para superar as dificuldades e os medos encontrados no caminho.

Aos meus pais, Benedito e Valerie, que apoiaram com muito amor minha decisão de seguir meu verdadeiro sonho e por estarem comigo em todos os instantes com todas as dificuldades que encontramos.

À memória dos meus avôs Vivaldi Castelo e Benedito, minha avó Aparecida Castelo, minha tia-avó Donata Castelo e minha tia Walkiria Castelo que não estando mais entre nós, sei que estão todos comigo no coração e nos pensamentos, me protegendo, me guiando e me levantando. E também a toda minha família, que apesar da distância física e emocional, são vocês que sempre estarei carregando no coração.

Ao professor, Antônio Eduardo Hermeto, meu mestre e mentor, que me apoiou em todos os instantes lembrando da força que existia em mim e de seguir com o coração meus sonhos sem desistir e por segurar minha mão quando eu me encontrava desmotivado e assim, me reerguendo.

Aos professores, Paulo Fernando Ribeiro e Benedito Donizeti Bonatto, pela orientação, e também por toda motivação e confiança no meu trabalho, sempre me lembrando da minha capacidade para realização dessa dissertação. Ao professor José Maria de Carvalho pelo acolhimento quando voltei à universidade. Ao professor Zambroni pelas mensagens positivas. Ao professor Ivan da Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio no artigo e conhecimento.

Aos amigos Rafael Couto, Ronan, Ana Helena, Fabrício, Pedro, Willer, Mateus, Liliam e Ramiro por todos os chocolates trazidos durante as noites trabalhadas na dissertação, pela motivação de conclusão do meu trabalho e apoio constante. A todos os professores que passaram na minha vida e aos amigos que proporcionaram momentos essenciais. Ao CNPq, ao CERIn e à UNIFEI pelo apoio financeiro e estrutural na pesquisa.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XII
RESUMO.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância do Tema.....	1
1.2 Estado da Arte.....	2
1.3 Objetivos e Contribuições da Dissertação	4
1.4 Estrutura da Dissertação	4
2. A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	6
2.1 Considerações Iniciais	6
2.2 O Conceito da Geração Distribuída	6
2.3 Tecnologias das Gerações Distribuídas	8
2.4 Impactos das Gerações Distribuídas nos Sistemas de Distribuição.....	9
2.5 Políticas de Acesso às Redes das Concessionárias de Energia para as Gerações Distribuídas.....	10
2.5.1 PRODIST – Procedimentos de Rede de Distribuição de Energia Elétrica.....	10
2.5.2 Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012.....	14
2.6 Considerações Finais	15
3. SISTEMA FOTOVOLTAICO	16
3.1 Considerações Iniciais	16
3.2 Aproveitamento e Funcionamento dos Dispositivos Fotovoltaicos	16
3.3 Configuração de Sistemas Fotovoltaicos	17
3.4 Conexão de Sistemas Fotovoltaicos em Redes de Distribuição	19
3.5 Impactos da Geração Fotovoltaica na Rede de Distribuição	19
3.5.1 Fluxo de Potência	20
3.5.2 Variações de Tensões – Sobretensões e Subtensões	22
3.5.3 Injeção de Harmônicos	23
3.5.4 Desequilíbrio de Tensão	25

3.5.5	Condição de Curto-Circuito	25
3.5.6	Níveis de Potência Reativa	25
3.6	Considerações Finais	25
4.	PROPOSTA DE METODOLOGIA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM	27
4.1	Considerações Iniciais	27
4.2	Definição do Conceito de Capacidade de Hospedagem	27
4.2.1	Método de Avaliação da Capacidade de Hospedagem com Relação à Margem de Sobretensão	29
4.2.2	Método de Avaliação da Capacidade de Hospedagem com Relação às Distorções Harmônicas	33
4.3	Considerações Finais	37
5.	ESTUDO DE CASO	38
5.1	Considerações Iniciais	38
5.2	Escolha do <i>Software</i> de Simulação e Medição	39
5.3	Instalação dos Painéis Fotovoltaicos no Centro de Excelência Em Redes Elétricas Inteligentes (CERIn) no Campus da UNIFEI	41
5.3.1	O Campus da Universidade Federal de Itajubá	41
5.3.2	Os Painéis Fotovoltaicos Instalados no CERIn	44
5.3.3	Pontos de Medição na SE do CERIn através de Analisadores de QEE	46
5.3.4	Avaliação dos Impactos da Geração Solar do CERIn na Qualidade de Energia	49
5.4	Estimativa da capacidade de Hospedagem de Sobretensões Permitidas Através de Medição	69
5.4.1	Apresentação dos Resultados de Medição	70
5.5	Estimativa da capacidade de Hospedagem através de Distorções Harmônicas	77
5.5.1	Considerações Iniciais para a Simulação	77
5.5.2	Estudo de Caso: O CERIn e a Rede Elétrica da UNIFEI	78
5.6	Considerações Finais	94
6.	CONCLUSÕES	96
6.1	Conclusões Gerais	96
6.2	Proposta para Trabalhos Futuros	98
6.3	Artigo Publicado	98
	REFERÊNCIAS	99
	ANEXO A – Entrada de Dados	105
	ANEXO B – Procedimento de Simulação	112

ANEXO C – Especificação dos Medidores.....	121
ANEXO D – Especificação do Painél Fotovoltaico.....	123
ANEXO E – Diagrama Unifilar PV CERIn.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura dos Módulos do PRODIST. (PRODIST - Módulo 1, 2015).	10
Figura 2.2 - Etapas de acesso obrigatórias para centrais geradoras solicitantes de autorização. (PRODIST – Módulo 2, 2012).	11
Figura 3.1 – Estrutura física de uma célula fotovoltaica.(VILLALVA, 2010).	16
Figura 3.2 – Configuração do sistema fotovoltaico isolado (VILLALVA, 2010).	18
Figura 3.3 – Configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (VILLALVA, 2010).	18
Figura 3.4 – Conjunto de 15 kWp instalado no telhado do prédio onde se localiza o CERIn. 19	
Figura 3.5 – Rede elétrica convencional (PALUDO 2014).	20
Figura 3.6 – Rede elétrica com geradores fotovoltaicos conectados (PALUDO 2014).	21
Figura 3.7 – Curvas de demanda de um sistema fotovoltaico (SHAYANI, 2010).	22
Figura 3.8 – Fluxo de potência reverso (SHAYANI,2010).	22
Figura 4.1 – Capacidade de Hospedagem (ETHERDEN & BOLLEN, 2011).	28
Figura 4.2 – Capacidade de Hospedagem com relação a distorção harmônica (SANTOS et al. 2015).	33
Figura 4.4 – Equivalente de Norton para uma ordem h (SANTOS et al. 2015).	34
Figura 5.1 – Diagrama unifilar representativo do sistema de distribuição da campus da UNIFEI.	39
Figura 5.2–DRANETZ <i>Power Guide 4400</i>	40
Figura 5.3–DRANETZ <i>Power Explore Px5</i>	40
Figura 5.4 – Universidade Federal de Itajubá pelo Google Earth.	42
Figura 5.5 – Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes (CERIn).	44
Figura 5.6 – Conjunto de 31 painéis fotovoltaicos no CERIn.	44
Figura 5.7 – Dados de irradiação solar local referente a 2013 (RENOVA. 2015).	45
Figura 5.8 –Estimação da produção de energia solar pelo PV (RENOVA. 2015).	45
Figura 5.9 – Conjunto de 2 inversores para o PV do CERIn (FRONIUS, 2015).	46
Figura 5.10 – Transformador a seco de 150 kVA do CERIn	47
Figura 5.11 – Medição de qualidade de energia na saída do PV.	48
Figura 5.12 – Medição de qualidade de energia na saída do transformador de distribuição do CERIn.	48

Figura 5.13 – Geração fotovoltaica durante a semana de 08/04/2015 a 15/04/2015.	50
Figura 5.14 – Geração fotovoltaica no dia 09/04/ 2015.	50
Figura 5.15 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase A.....	51
Figura 5.16 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase B.....	52
Figura 5.17 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase C.....	52
Figura 5.18 – Medição do fluxo de potência reverso durante a semana de medição.	53
Figura 5.19 – Comparação entre geração e demanda do CERIn através do fluxo de potência no dia 09 de Abril de 2015.	54
Figura 5.20 – Energia produzida pelo PV e e energia consumida pelo CERIn.....	54
Figura 5.21 – Contribuição do PV ao campus durante a semana de medição.....	55
Figura 5.22 – Desequilíbrio de tensão durante a semana de medição.	56
Figura 5.23 – Desequilíbrio de tensão no dia 09 de Abril de 2015.	57
Figura 5.24 – Distorção harmônica total da fase A no período de medição.....	58
Figura 5.25 – Distorção harmônica total das fases A, B e C do dia 9 de Abril de 2015.	59
Figura 5.26 - Distorção individual da tensão nos seus valores máximos, médios e mínimos para as ordens harmônicas: 3 ^a , 5 ^a , 9 ^a , 11 ^a e 13 ^a na semana de medição.	61
Figura 5.27 – Distorção harmônica individual média da fase A no dia 09 de Abril de 2015. .	62
Figura 5.28 – Distorção harmônica individual média da fase B no dia 09 de Abril de 2015...	62
Figura 5.29 – Distorção harmônica individual média da fase C no dia 09 de Abril de 2015...	63
Figura 5.30 – Espectro harmônico de tensão para as Fases A, B e C no dia 09 de Abril de 2015 no horário das 12h00.	63
Figura 5.31 – Fator de potência do PV durante o dia 09 de Abril de 2014 na faixa de horário onde há geração de energia.....	65
Figura 5.32 – Fator de potência do CERIn durante o dia 09 de Abril de 2014.	65
Figura 5.33 – Demanda de potência reativa pelo CERIn no dia 09 de Abril de 2015.	66
Figura 5.34 – Consumo de reativos pelo PV durante o dia 09 de Abril de 2015.....	67
Figura 5.35 – Potência reativa demandada pelo CERIn durante a semana de medição.....	67
Figura 5.36 – Frequência do CERIn durante a semana de medição.....	68
Figura 5.37 – Frequência do CERIn durante o dia 09 de Abril de 2015.....	69
Figura 5.38 - Topologia do diagrama Unifilar do CERIn.	70
Figura 5.39 – Tensões máximas das fases A, B e C na semana de medição.....	71
Figura 5.40 – Tensões mínimas das fases A, B e C na semana de medição.	71
Figura 5.42–Valores máximos, médios e mínimos da tensão fase-neutro na fase A durante a semana de medição.....	72

Figura 5.43–Perfil de Tensão entre fases máximas, médias e mínimas no período de medição.	73
Figura 5.44 - Perfil de Tensão entre fases máximas, médias e mínimas em p.u. na base de 220 V no período de medição.....	74
Figura 5.45–Perfil da Capacidade de Hospedagem de sobretensões permitidas para o CERIn.	76
Figura 5.46–Diagrama Unifilar Equivalente da UNIFEI com expansão do alimentador 4.	79
Figura 5.47–Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 15 kWp (Medição).....	84
Figura 5.48 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 15 kWp (Simulação).....	86
Figura 5.49–Comparação entre os valores simulados e medidos para 15 kWp.	86
Figura 5.50 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 30 kWp.	89
Figura 5.51 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 45 kWp.	91
Figura 5.53 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 180 kWp.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1–Categorias de GD quanto à máxima variação de Potência (ACKERMANN, et al. 2001).....	7
Tabela 2.2–Tecnologias das Gerações Distribuídas.	8
Tabela 4.1 - Capacidade de hospedagem por fase para tensão de 400V com 1% de margem de sobretensão (BOLLEN & HASSAN, 2011).....	30
Tabela 5.1 – Dados do Sistema de Entrada da UNIFEI.	42
Tabela 5.2–Estimativa dos Dados de Carga.	43
Tabela 5.3 – Distorção Harmônica Total de Tensão (PRODIST – Módulo 8).	58
Tabela 5.4 – Distorção Harmônica Individual de Tensão segundo o PRODIST (PRODIST – Módulo 8).	60
Tabela 5.5 – Relação do fator de Potência e as Potências Nominais das GDs (CEMIG, 2012).	64
Tabela 5.6–Valores Médios das Tensões de fase para as Medições Máximas, Médias e Mínimas.	73
Tabela 5.7–Medição das Tensões entre Fases.	73
Tabela 5.8 - Medição das Tensões entre Fases em p.u.....	74
Tabela 5.9–Margem de Sobretensões Máximas, Médias e Mínimas.	75
Tabela 5.10–Valores Calculados para a Capacidade de Hospedagem com	76
Tabela 5.11–Valores de Cargas Equivalentes	80
Tabela 5.12 – Valores de Cabos.	80
Tabela 5.13 – Valores dos Transformadores.	80
Tabela 5.14 – Equivalentes de Geração.....	80
Tabela 5.15–Valores Limite de Distorção Harmônica Individual [%].....	81
Tabela 5.16–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 15 kWp (Medição).	82
Tabela 5.17–Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp	82
Tabela 5.18–Distorção Harmônica Individual de Corrente (IEEE 519, 2014).	83
Tabela 5.19–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 15 kWp (Simulação).	84
Tabela 5.20 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp	85
Tabela 5.21–Correlação entre os Valores Medidos e Simulados.	87
Tabela 5.22–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 30 kWp.	87
Tabela 5.23 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp.	88

Tabela 5.24–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 45 kWp.	89
Tabela 5.25 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 45kWp.	90
Tabela 5.26 – Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 180 kWp.	92
Tabela 5.27 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 180 kWp	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CCD	Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CERIn	Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes
CUSD	Contrato do Sistema de Distribuição
DHT	Distorção Harmônica Total
DHI	Distorção Harmônica Individual
DTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
GD	Geração Distribuída
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
p.u.	por unidade
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PTW	<i>Power Tools for Windows</i>
PV	Painel Fotovoltaico
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> (valor eficaz)
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

RESUMO

A inserção de fontes de geração distribuída em um sistema elétrico pode trazer diversos impactos nesta rede, tais como: elevação dos níveis de curto-circuito, alteração do fluxo de carga, modificação do perfil de perdas elétricas, deterioração da qualidade da energia elétrica, entre outros. Neste sentido, supõe-se haver um limite, ou capacidade de hospedagem, para cada ponto do sistema, de forma que tais inserções não causem a ultrapassagem dos valores de referência considerados para os diversos parâmetros de proteção, segurança operativa e de qualidade de energia do sistema. Esta dissertação apresenta uma proposta da aplicação de metodologias de estudo da capacidade de hospedagem de fontes de geração distribuída no sistema de distribuição de energia elétrica de um campus universitário. A análise da inserção das novas tecnologias de geração distribuída, como por exemplo, painéis fotovoltaicos, no sistema de distribuição deste campus universitário foi realizada inicialmente via processos analíticos e posteriormente por simulações computacionais em programas baseados em simulações de regime permanente, como o SKM-PTW. Para testar as metodologias propostas, foram utilizados dados reais de medições dos painéis fotovoltaicos instalados no Centro de Excelência em Redes Inteligentes (CERIn) e, em seguida, foram realizadas simulações da expansão do sistema de geração distribuída do CERIn e expansão para o campus da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

Palavras-Chaves: geração distribuída, capacidade de hospedagem, geração fotovoltaica, sobretensões permitidas, distorções harmônicas, qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

The integration of distributed generation sources in an electrical system can bring various impacts on this network, such as: high short circuit levels, load flow alteration, modification of the profile of electrical losses, deteriorating power quality, among others. In this sense, it is assumed a limit, or hosting capacity for each point of the system, so that such insertions do not cause the exceeding of the reference values for the various parameters of protection, operational safety and quality of the energy of the system. This dissertation presents a proposal of application of hosting capacity study methodologies of distributed generation sources in the electric power distribution system of a University campus. The analysis of the insertion of new distributed generation technologies, such as photovoltaic panels in the distribution system of this campus was carried out initially via analytical processes, and later by computer simulations in steady state simulation-based programs, such as the SKM-PTW. To test the proposed methodology it was used actual data from measurements of the photovoltaic panels installed on the Center of Excellence in Smart Grids (CERIn). Then, it was run simulations of the expansion of the distributed generation system of CERIn and expansion to the campus of the Federal University of Itajuba (UNIFEI).

Keywords: distributed generation, hosting capacity, photovoltaic generation, overvoltage, harmonic distortion, power quality.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do Tema

O Brasil atravessou uma recente crise energética no qual suas consequências são evidentes, como por exemplo, o aumento na tarifação da energia elétrica. Assim, as vantagens apresentadas pela forma de geração centralizada dependente dos recursos hidrográficos e também dos regimes de chuva foram colocadas em questão. No âmbito do consumidor, produzir sua própria energia elétrica é uma opção para quem não deseja ser prejudicado por interrupções indevidas no fornecimento de energia e deseja evitar as altas tarifas nos horários de pico de demanda. Assim, a geração distribuída (GD) se destaca como alternativa para solução de problemas de suprimento energético através de várias características vantajosas: maior aproveitamento de recursos energéticos regionais com diversificação das fontes primárias, melhor aproveitamento da sazonalidade, uma melhor complementação com relação à geração hidráulica e finalmente, economia em investimentos na transmissão e distribuição de energia elétrica com suprimento local de parte da demanda dos sistemas a que estão conectados (BOLLEN & HASSAN, 2011).

Em um cenário mundial, o emprego da geração distribuída vem crescendo, e auxiliando no suprimento da demanda de energia. As características desses geradores se opõem ao cenário de uma geração centralizada, pois têm por objetivo fornecer energia às cargas mais próximas. A geração fotovoltaica é a forma de geração distribuída que ganha maior destaque atualmente em uma perspectiva ambiental. É a que busca maiores soluções sustentáveis e renováveis já que o sol é uma fonte renovável e limpa, além de que a sua forma de instalação evita grandes impactos ambientais, sonoros e visuais onde se encontram.

Entretanto, quando há inserção de geração distribuída, no que diz respeito a qualquer tipo de tecnologia empregada para a mesma, alguns desafios surgem, tais como: a modificação considerável da topologia da rede, mudança dos níveis de curto-circuito e nos ajustes necessários à proteção, mudanças nos critérios e ajustes de regulação de tensão, influência em parâmetros de qualidade da energia elétrica e também nos índices de continuidade e confiabilidade da rede, além de possíveis impactos na operação e estabilidade do sistema de potência, especialmente em situações de rejeição de carga ou de geração, devido a distúrbios, ou por incompatibilidade de operação interligada (MIGUEL & CARVALHO, 2011). Portanto, atualmente é um tema de pesquisa relevante avaliar a capacidade de hospedagem de geração distribuída em um sistema elétrico.

1.2 Estado da Arte

Uma publicação importante sobre Capacidade de Hospedagem é o livro intitulado: *Integration of Distributed Generation in the Power System* (BOLLEN & HASSAN, 2011) dos professores M.H.J Bollen e F. Hassan, no qual é abordado o tema geração distribuída integrada a sistemas elétricos desde sua teoria até questões práticas, pois todas as questões nele discutidas foram abordadas dentro dos indicadores de qualidade de energia elétrica através do critério de capacidade de hospedagem de fontes renováveis em uma rede. Adicionalmente, tem o objetivo de suprir as carências de literaturas que abordem esta temática.

Artigos recentes, como (ETHERDEN & BOLLEN, 2011) também abordam o conceito de capacidade de hospedagem, em um sistema de distribuição real. Neste artigo os autores abordam dois critérios de avaliação: sobretensão e sobrecorrente. Examinou-se em que medida a capacidade de hospedagem pode ser determinada com informações em tempo real e cálculo dos indicadores de desempenho dinâmico que regem a capacidade de hospedagem local mostrando que existe um potencial do aumento da capacidade de hospedagem sem a construção de novas linhas.

Em (SANTOS et al., 2015) mostrou-se o estudo e uma metodologia da determinação da capacidade de hospedagem com relação às distorções harmônicas através da inserção de fontes renováveis que fazem uso de eletrônica de potência. Este artigo é base dos estudos que serão desenvolvidos nesta dissertação, aplicando a metodologia e analisando os conceitos abordados no comportamento da distorção harmônica com a penetração de novas fontes geradoras.

Outro trabalho referente ao tema é apresentado em (RYLANDER et al., 2015) que descreve uma metodologia através de uma análise simplificada na determinação da quantidade de geração fotovoltaica, em particular, podendo ser inserida em um alimentador de distribuição na prevenção de impactos. O objetivo da solução é usado no pedido de inserção de novos elementos ao longo daquele sistema de distribuição, mostrando os pontos problemáticos do sistema integrado.

De forma geral, as pesquisas envolvendo a temática de Tecnologias de *Smart Grids* e Capacidade de Hospedagem assumem grande relevância nos dias atuais e tem perspectivas futuras nas novas topologias de redes elétricas (RIBEIRO, 2012). Este projeto pode, eventualmente, contribuir com os seguintes resultados:

1. Redução dos impactos de geração distribuída nas transmissoras e distribuidoras;
2. Diminuição das perdas técnicas e não técnicas;
3. Melhoria da confiabilidade e qualidade das redes elétricas;
4. Melhoria da segurança operacional;
5. Estudo de opções de geração e armazenamento de energia;
6. Avaliação da participação mais ativa e integrada por parte do consumidor no sistema elétrico;
7. Antecipação e respostas aos distúrbios no sistema;
8. Utilização mais eficiente da energia elétrica por parte do consumidor otimizando assim a distribuição de energia de acordo com a demanda nos diferentes períodos do dia, gerando impacto positivo para todo o sistema.

As principais publicações referentes ao tema estão inclusas nas referências bibliográficas demonstrando trabalhos na área que tratam os índices e seus impactos de forma separada.

Esta revisão bibliográfica apresentou alguns dos principais trabalhos publicados na área de Capacidade de Hospedagem destacando a importância da avaliação dos índices desses sistemas integrados a gerações distribuídas. Estes trabalhos mostraram a evolução do conhecimento nas metodologias de simulação dos critérios de capacidade de hospedagem a fim de contribuir com a previsão e redução ou mesmo mitigação de problemas para os consumidores e concessionárias de energia elétrica.

No entanto, a maior parte dos trabalhos publicados sobre simulações consideraram apenas alguns índices escolhidos com base em critérios locais. Neste trabalho de dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica pela UNIFEI são avaliadas duas metodologias propostas contribuindo para ampliar a compreensão e utilização do conceito de capacidade de hospedagem de geração distribuída em um sistema elétrico. Neste contexto, esta dissertação propõe aplicação dos procedimentos de simulação e medição voltados especialmente para a rede de média tensão da UNIFEI escolhendo dois critérios: sobretensões e distorções harmônicas.

A título de exemplo de aplicação dos procedimentos propostos, são mostrados os resultados obtidos de medições e simulações de uma instalação real do CERIn e de um sistema real da UNIFEI. Por último, é realizado um processo de validação dos resultados

simulados com as medições que ocorreram no CERIn, obtidas no período de monitoração de uma semana, segundo o PRODIST.

1.3 Objetivos e Contribuições da Dissertação

Esta dissertação tem por objetivo, conforme já relatado, de realizar uma análise qualitativa do impacto na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) com relação a sobretensões e distorções harmônicas, com a instalação de Painéis Fotovoltaicos (PVs) no Centro de Excelência em Redes Inteligentes (CERIn) e no Campus da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. As motivações e justificativas deste trabalho fundamentam-se no cenário energético que o país vivencia atualmente e, conseqüentemente, na necessidade de se buscar formas alternativas de geração sustentável de energia. Atualmente, no campus da UNIFEI em Itajubá-MG, Brasil, tem-se uma infraestrutura de pesquisa devido à instalação de um sistema de painéis fotovoltaicos com potência de $15 kW_p$ no prédio do CERIn.

Logo, o foco do presente trabalho é prever os impactos na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) devido à quantidade de PVs quando conectados à rede, considerando por exemplo, distorções harmônicas (em função dos inversores eletrônicos), regulação de tensão (devido a sobretensões), continuidade de fornecimento, influências no sistema de proteção, etc., quando da disseminação do uso de PVs no sistema de distribuição da UNIFEI. Neste sentido, o campus universitário da UNIFEI está se tornando um “Laboratório Vivo” em que, futuramente, diversas unidades de geração através de PVs serão conectadas, possibilitando estudos, pesquisas, simulação e experimentos de campo em tempo real nesta *microgrid*. Assim, a quantidade de geração máxima de forma dispersa que pode ser suportada pela rede é chamada de Capacidade de Hospedagem através do conceito apresentado na literatura por BOLLEN ET AL. (2008).

Utilizando medições e simulação estacionárias, os principais impactos de tal conexão serão enumerados, caracterizados e analisados, apontando soluções técnicas de forma a harmonizar esta interação entre sistemas de geração distribuída e as características reais do sistema elétrico de distribuição do campus universitário da UNIFEI em Itajubá.

1.4 Estrutura da Dissertação

O documento de dissertação está apresentado em seis capítulos descritos nos próximos parágrafos.

No capítulo 1 descreve-se a relevância do tema, o estado da arte abordando os importantes trabalhos da área que já foram realizados, o objetivo, as contribuições e esta estrutura do trabalho.

O capítulo 2 mostra a definição de geração distribuída, suas principais características e tecnologias, aspectos de regulação no cenário brasileiro, além dos procedimentos de rede e alguns dos impactos causados através do seu uso.

No capítulo 3 são discutidos o conceito da geração fotovoltaica e os impactos causados nos parâmetros de qualidade de energia elétrica quando inseridos em sistemas elétricos de distribuição.

No capítulo 4 é apresentado o conceito da capacidade de hospedagem e as metodologias propostas para a determinação dos índices com relação a sobretensões permitidas e distorções harmônicas no cenário de uma rede de distribuição de energia. Também são discutidos os procedimentos de simulação e medições em redes de distribuição e transmissão.

No capítulo 5 são realizadas duas etapas para o estudo de caso proposto, ou seja, a inserção de PVs na rede elétrica da UNIFEI e do CERIn. A primeira etapa consiste em analisar os impactos nos índices de QEE segundo referências do PRODIST – Módulo 8 sobre a inserção dos $15 kW_p$ de geração solar no prédio do CERIn. Já a etapa 2 consiste na análise e aplicação das metodologias apresentadas pelo Capítulo 4 com relação à capacidade de hospedagem. O primeiro estudo foi realizado com relação às medições de sobretensões no prédio do CERIn, e assim, calculou-se o quanto de PV pode ser inserido sem que os índices de sobretensões sejam violados. No segundo estudo, aplicou-se os conceitos de capacidade de hospedagem com relação às distorções harmônicas no âmbito de medição e simulação mostrando as validações das simulações com as medições. Em seguida, ampliou-se os níveis de penetração para $30 kW_p$ e $45 kW_p$ no prédio do CERIn e finalmente, para o alimentador referente à SE de entrada da CEMIG no campus da UNIFEI e validação do método proposto.

O capítulo 6 conclui o trabalho e apresenta propostas de trabalhos futuros.

Finalizando os seis capítulos, são apresentadas as validações das metodologias empregadas e também a resposta da pergunta sobre o quanto de geração distribuída pode ser inserida no campus da UNIFEI e no prédio do CERIn. O Anexo A contém informações sobre a entrada de dados e o Anexo B apresenta o procedimento de simulação no *software* utilizado no exemplo de aplicação. O Anexo C apresenta a especificação dos medidores de qualidade de energia utilizados neste projeto.

2. A GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os conceitos gerais e definições básicas sobre Geração Distribuída (GD) e os aspectos regulatórios. As principais fontes de geração distribuída são citadas, tais como: geração eólica, solar, hidrogeração, dentre outras.

2.2 O Conceito da Geração Distribuída

O cenário tradicional de geração de energia a no sistema elétrico brasileiro é composto por grandes usinas hidrelétricas e todas as configurações de transmissão de energia e distribuição projetadas em uma topologia radial, ou seja, alimentação dos grandes centros de cargas a distâncias muito grandes, sem qualquer presença de fontes geradoras nestes centros de carga, tal que o fluxo de potência iria fluir somente em uma direção. Este tipo de estrutura provia economia de escala, confiabilidade, segurança e qualidade de entrega da energia através deste controle centralizado. A esta configuração foi dado o nome de Geração Centralizada (GONÇALVES, 2004).

Com os anos, veio a necessidade de incrementar o uso de geração de energia renovável de forma consciente devido aos atuais cenários de crise energética e também como forma de preservar o meio ambiente. Assim, vários países ao redor do mundo adotaram o uso de geração de energia através de fontes renováveis por meio de tratados internacionais de redução de emissão de gases à atmosfera, como o Protocolo de Kyoto (1988) ou a Conferência de Copenhague (2009). Estas fontes de energia podem ser obtidas de diversas formas entre elas: Solar, eólica, biomassa, geotérmicas, etc. Dentro do cenário da matriz energética mundial, a energia solar fotovoltaica ganha força, representando elevado crescimento nos últimos anos (CAPITANESCU, 2014). O uso dela inicialmente era utilizado para atendimento de comunidades isoladas, porém seu uso tem sido integrado aos sistemas de distribuição de energia instalados em grandes centros urbanos que são energizados através de fontes convencionais. A integração de fontes de energia renováveis a sistemas de distribuição é denominada Geração Distribuída (GD) (SHAYANI, 2010).

No Brasil, a ANEEL através da resolução normativa nº 482/2012 caracteriza a geração distribuída como *“centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de*

instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas” (ANEEL, 2012).

Através da análise do cenário atual e do conceito explicitado, é notável que cada dia mais a geração descentralizada é uma forte tendência do mercado, seja por eficiência energética ou seja por questões socioambientais. Por isso, algumas definições são levadas em consideração através da “*Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 1 – Introdução*” (2015):

- 1) Propósito: suprir parte ou toda a demanda de potência ativa dos consumidores;
- 2) Localização: conectada à rede pelo lado do consumidor;
- 3) Variação de potência (apresentada na Tabela 2.1):

Tabela 2.1–Categorias de GD quanto à máxima variação de Potência (ACKERMANN, et al. 2001)

Geração Distribuída	
Categoria	Máxima Variação de Potência
Micro	1 W < 5 kW
Pequena	5 kW < 5 MW
Média	5 MW < 50 MW
Grande	50 MW < 150 MW

4) Área de fornecimento de potência: toda potência produzida é consumida na própria rede de distribuição, porém há casos que há excedente e esta é exportada através do sistema de transmissão;

5) Tecnologia: há diversas tecnologias empregadas, porém as que merecem maior destaque são aquelas que fazem uso de fontes renováveis de energia;

6) Impactos ambientais: GD é considerada de baixo impacto ambiental, pois a maioria das tecnologias empregadas demandam energia de fontes renováveis.

Como foi visto, a GD pode estar associada a diversas tecnologias e estas se diferem pela fonte de combustível, pelo tipo de conexão e pela capacidade de geração.

2.3 Tecnologias das Gerações Distribuídas

As fontes alternativas de geração são conhecidas como geração eólica, geradores a combustíveis, células fotovoltaicas, micro turbinas, etc. e o uso dessas fontes devido a avanços na eletrônica de potência e mudanças legislativas têm se ampliado (ALTIN, 2014). A Tabela 2.2 compara a natureza dessas tecnologias.

Tabela 2.2–Tecnologias das Gerações Distribuídas.

Tipo	Definição	Atributos
Geradores a Combustíveis	Produção combinada do calor e eletricidade com utilização efetiva das duas formas de energia.	Produção de calor e energia elétrica com rendimento de 90%, a indústria fica menos vulnerável às falhas na rede elétrica e usando o gás natural, os níveis de poluição são reduzidos.
Micro-Geração	A micro geração consiste numa forma combinada entre calor e eletricidade utilizada em sistemas com potência reduzida, em torno de 150 kW ou menos, interligados à rede de baixa tensão.	Define-se também a distinção entre micro geração doméstica (Inferior a 10 kW) e não doméstica (entre 10 kW e 150 kW).
Biomassa	A biomassa é uma fonte de energia comum, derivada de produtos e subprodutos da floresta, resíduos da indústria da madeira, resíduos obtidos de fluidos marinhos, resíduos de culturas agrícolas, etc.	Salienta-se que a biomassa, em termos de oferta de energia primária, poderia representar uma das maiores participações das renováveis, assegurando também uma política energética flexível.
Energia Eólica	As turbinas eólicas, também conhecidas como aerogeradores, têm como função transformar a energia cinética do vento em energia mecânica e, conseqüentemente, em energia elétrica.	As grandes vantagens na produção de energia elétrica pelos aerogeradores estão na boa relação entre preço e quantidade de energia produzida, superior à energia solar
Energia Solar	É um tipo de energia proveniente da captação de energias térmicas e luminosas provenientes do Sol. A captação deste tipo de energia se dá por painéis solares, formados por células fotovoltaicas e transformado em energia elétrica ou mecânica.	As vantagens ambientais deste tipo de geração é a diminuição de emissão de poluentes pelo fato de ser uma produção silenciosa e além de não precisar de manutenção e ser de fácil instalação em qualquer edifício.

2.4 Impactos das Gerações Distribuídas nos Sistemas de Distribuição

As fontes renováveis causam impactos quando conectados à rede elétrica de distribuição convencional devido à mudança de topologia, pois os sistemas de distribuição são passivos e projetados para a presença de uma fonte geradora e para uma potência unidirecional. Estes sistemas serão ativos se apresentarem um fluxo de potência bidirecional fazendo o papel de consumidor de energia e de gerador de energia. Como os sistemas de distribuição não foram projetados para receber essa bidirecionalidade do fluxo de energia, estes poderão apresentar problemas com o crescimento das GD (TREVISAN, 2011). Segundo Observa-se que outros impactos podem ser listados, tais como: problemas na regulação de tensão e frequência, alteração dos níveis de curto-circuito, ilhamento não-intencional, distúrbios na qualidade de energia, despacho de geração entre outros problemas econômicos devido ao aumento da penetração destas fontes de GD (GONÇALVES, 2004).

Segundo Trevisan (2011), a inserção de poucas fontes de GD no sistema de distribuição praticamente não possuem impactos, a menos que o sistema de distribuição seja fraco. Entretanto, a tendência mundial é que haja um crescimento das GD nos próximos anos fazendo com que a parcela se torne significativa e desta forma os efeitos em cima do sistema elétrico seria notável.

Conforme Trevisan (2011), existem nove diferentes impactos com a inserção de GD que estão relacionados à QEE:

- Afundamento de tensão;
- Interrupções de curta duração;
- Interrupções de longa duração;
- Distorções harmônicas;
- Flutuações de tensão;
- Ruídos;
- Desequilíbrios de tensão.

No próximo capítulo serão aprofundados os impactos relacionados à geração fotovoltaica e suas tecnologias, pois este é o objeto deste estudo.

2.5 Políticas de Acesso às Redes das Concessionárias de Energia para as Gerações Distribuídas

O avanço da Geração Distribuída motivada pela conscientização ambiental, pelas políticas de incentivo e pelos avanços tecnológicos fez surgir a necessidade de padronizar o acesso dos pequenos produtores de energia às diversas distribuidoras do país devido ao aumento do número de solicitações de acesso às redes das distribuidoras (ROCHA, 2010).

Para tanto, a ANEEL elaborou, juntamente com os agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, o PRODIST que normatiza e padroniza as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Através do PRODIST e das necessidades operativas e técnicas de cada distribuidora é elaborado o denominado “Parecer de Acesso”, inerente a cada uma dessas distribuidoras. Nele constam os pré-estudos exigidos do acessante pela acessada e as etapas de viabilização da conexão em paralelo com a rede da distribuidora (PRODIST - Módulo 1, 2015).

2.5.1 PRODIST – Procedimentos de Rede de Distribuição de Energia Elétrica

“Os Procedimentos de Distribuição são documentos elaborados pela ANEEL, com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.” (PRODIST - MÓDULO 1, 2015).

O PRODIST é composto de seis módulos técnicos e dois integradores como mostrado na Figura 2.1 .

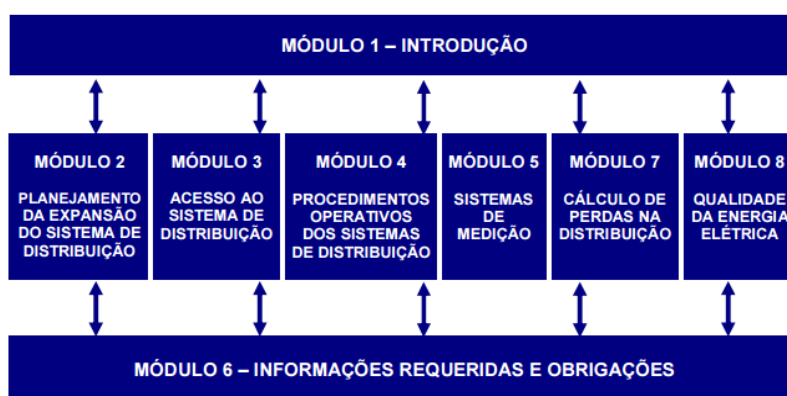


Figura 2.1 – Estrutura dos Módulos do PRODIST. (PRODIST - Módulo 1, 2015).

Os principais objetivos do PRODIST são:

- a) Garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- b) Propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- c) Disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;

Dentre os oito módulos do PRODIST, o Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição” (PRODIST - Módulo 3, 2012) refere-se ao acesso de unidades de geração distribuída às redes de distribuição das concessionárias.

O objetivo desse módulo é *“estabelecer as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso ao sistema de distribuição, não abrangendo as Demais Instalações de Transmissão (DIT), e definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados, e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes.”*

Seção 3.1- Procedimentos de Acesso

São definidas e descritas as quatro etapas necessárias à obtenção do acesso ao sistema de distribuição. A Figura 2.2 apresenta o fluxograma referente a essas etapas.

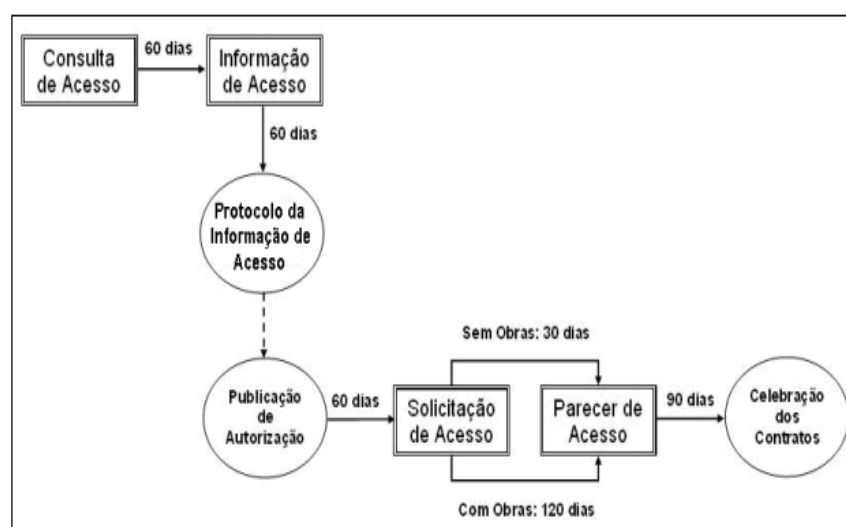


Figura 2.2 - Etapas de acesso obrigatórias para centrais geradoras solicitantes de autorização. (PRODIST – Módulo 2, 2012).

As etapas para acesso são, segundo o PRODIST – Módulo 3:

Etapa 1- Consulta de Acesso: Tem objetivo de obter informações técnicas da acessada que subsidiem os estudos de acesso pela acessante à rede.

Etapa 2 – Informação de Acesso: É a resposta formal e obrigatória da acessada à Consulta de Acesso (Etapa 1) e deve indicar: a classificação da atividade do acessante; quando couber, informações sobre a regra de participação financeira; quando central geradora, definição do ponto de conexão mais econômico; características dos sistema de distribuição acessado e do ponto de conexão; tarifas de uso aplicáveis; responsabilidades do acessante e relação de estudos e documentos a serem apresentados na solicitação de acesso. Essas informações devem ser apresentadas ao acessante, por escrito, no prazo máximo de 60 dias.

Etapa 3- Solicitação de Acesso: É o requerimento formulado pelo acessante que deve conter: o contrato de concessão; o projeto das instalações de conexão e demais dados solicitados pela acessante por ocasião. Essas informações devem ser apresentadas pelo acessante à acessada, por escrito, no prazo máximo de 60 (sessenta) dias.

Etapa 4 – Parecer de Acesso: É o documento formal obrigatório apresentado pela acessada onde são informadas principalmente as condições de acesso (conexão e o uso do sistema de distribuição) e os requisitos técnicos que permitam a conexão das instalações do acessante.

Seção3.2- Critérios Técnicos e Operacionais

Tem como objetivo definir critérios técnicos e operacionais mínimos para o desenvolvimento de projetos de acesso ao sistema de distribuição, abrangendo: ampliações e reforços no sistema de distribuição da acessada; paralelismo de centrais geradoras de energia e compartilhamento de instalações de conexão e configurações de barras de subestações (PRODIST – Módulo 3, 2012).

Algumas condições gerais serão citadas como exemplos:

- O paralelismo das instalações com o sistema não pode causar problemas técnicos ao sistema, nem ao pessoal envolvido na sua operação e manutenção e os demais acessantes;
- O acessante deve ajustar suas proteções;
- Deve existir um sistema de comunicação entre o acessante e a acessada para bom desempenho da operação;

- O acessante deve efetuar estudos básicos para avaliar: níveis de curtos-circuitos; capacidade de disjuntores, barramentos e transformadores de instrumentos; sistemas de controle de tensão e frequência;
- As unidades de produção de energia acessantes devem garantir que suas instalações operem com fator de potência dentro dos limites estabelecidos.

Seção3.3 – Requisitos de projeto

O objetivo dessa seção é definir os requisitos a serem observados pelos acessantes que necessitam elaborar projetos de instalações de conexões. Os requisitos gerais são: as instalações devem ser projetadas observando as características técnicas, normas e padrões; a acessada deve indicar à acessante as normas e padrões a serem utilizados; os projetos devem conter um memorial descritivo das instalações de conexão, os dados e características do acessante (PRODIST – Módulo 3, 2012).

Seção3.4 – Implantação de Novas Conexões

Nessa seção são estabelecidos os procedimentos para implementação, vistoria e recepção de novas conexões compreendendo suas implantações, ensaios, acompanhamento e aprovação (PRODIST – Módulo 3 3, 2012).

As centrais geradoras têm responsabilidade de: elaborar o projeto executivo das instalações submetendo-o à aprovação; executar as obras civis e de montagem das instalações; realizar o comissionamento das instalações de conexão de sua responsabilidade sob supervisão da acessada. Já as acessadas devem reavaliar inspeções, vistorias, ensaios e testes a fim de avaliar a conexão quanto às exigências operacionais.

Seção3.5 – Requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão

São estabelecidos os requisitos para operação, manutenção e segurança das instalações de conexão ao sistema de distribuição, bem como as atribuições, diretrizes e responsabilidades do acessante e da acessada quanto à operação e à manutenção do ponto de conexão (PRODIST – Módulo 3, 2012).

Seção3.6 – Contratos

O objetivo dessa seção é apresentar as diretrizes para elaboração do Contrato de Conexão às Instalações de Distribuição (CCD) e do Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) que estabelecem as condições gerais e especiais dos serviços compreendendo condições técnicas e comerciais (PRODIST – Módulo 3, 2012).

Seção3.7 – Acesso de Micro e Minigeração Distribuída

Tem como objetivo descrever os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição.

2.5.2 Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012

Resoluções Normativas são publicadas no Diário Oficial da União regularmente pela ANEEL. São atos regulamentares de interesse geral voltados às atividades do setor elétrico e têm por objeto o estabelecimento de diretrizes, obrigações, encargos, condições, limites ou quaisquer deveres e direitos dos agentes e usuários desse serviço público (ANEEL, 2012).

A Resolução Normativa n°482/2012 “*estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.*” (ANEEL, 2012).

Na Resolução Normativa n°482/2012 fica declarado que “*As distribuidoras deverão adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais.*”

Consta em seu teor a definição do Sistema de Compensação, o qual é um arranjo no qual a energia ativa injetada pela micro ou minigeração é cedida à distribuidora local e posteriormente compensada a essa mesma unidade consumidora, sendo os custos inerentes à adequação do sistema de medição de responsabilidade do interessado e também, caso haja dano ao sistema elétrico de distribuição e esse seja comprovadamente atribuído à micro ou minigeração, os créditos de energia ativa gerados no período não poderão ser utilizados no sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012).

2.6 Considerações Finais

Foi apresentado o conceito da Geração Distribuída dentro dos sistemas elétricos de distribuição e também as principais tecnologias aplicadas as fontes renováveis de energia. Foram conceituados os principais impactos causados por esse tipo de geração. Por fim, as políticas de acesso à rede foram descrito através do PRODIST Módulo 3, assim como a resolução normativa ANEEL n° 482/2012.

3. SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados o funcionamento básico de um sistema fotovoltaico, assim como as suas configurações e sua interface com os sistemas de distribuição de energia. Por fim, os impactos que estes sistemas de geração de energia trazem aos sistemas o qual estão conectados.

3.2 Aproveitamento e Funcionamento dos Dispositivos Fotovoltaicos

A energia solar pode ser aproveitada tanto na produção de calor, quanto na produção de energia elétrica, através das células fotovoltaicas que são definidas como dispositivos com a capacidade de transformar a energia luminosa vinda do sol ou de alguma outra forma de luz, em energia elétrica (DUDIÁK, 2014).

Existem outras maneiras de aproveitar os raios do sol no intuito da geração de eletricidade, como por exemplo: Iluminação natural de ambientes reduzindo a necessidade de iluminação artificial, aquecimento de água em substituição do chuveiro elétrico, no uso de calefação de casas em locais frios, aquecimento de fluidos que geram vapor e movimentam turbinas para geração de energia e geração direta pelo efeito fotoelétrico (SHAYANI, 2010).

Uma célula fotovoltaica é constituída de materiais semicondutores dopados, formando uma junção $p-n$ exposta à luz, como mostrado na Figura 3.1. Quando a luz solar incide sobre essa junção, forma-se um campo elétrico forçando a circulação de cargas elétricas sob a forma de corrente contínua (GONÇALVES, 2004). A ocorrência do fenômeno acontece quando a energia do fóton incidente é o suficiente para excitar os elétrons covalentes do material semicondutor, fenômeno que depende do material utilizado na construção do dispositivo e do comprimento de onda da luz incidente. O efeito fotovoltaico depende da absorção da radiação solar, da geração e transporte de portadores de carga no semicondutor, da geração dos portadores pela junção $p-n$ e da coleta dos portadores através dos terminais do dispositivo (VILLALVA, 2010).

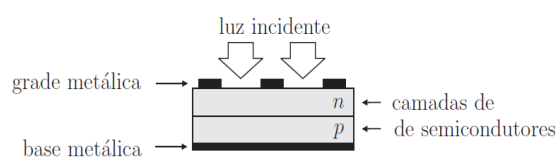


Figura 3.1 – Estrutura física de uma célula fotovoltaica.(VILLALVA, 2010).

As células fotovoltaicas apresentam eficiência de conversão na ordem de 16% para células constituídas de Silício, mas existem também células fotovoltaicas que apresentam eficiência de até 28%, fabricadas de arseneto de gálio, porém o seu custo alto de produção limita o uso em casos especiais como o uso para indústria espacial na fabricação de satélites, por exemplo (MIGUEL & CARVALHO, 2011).

Para elevar os níveis de corrente e tensão geradas nas células fotovoltaicas, estas podem ser associadas em série ou em paralelo formando os arranjos dos painéis fotovoltaicos que irão fornecer tensão e corrente de saída da maneira mais adequada. Para o aumento do nível de geração de energia, os painéis, por sua vez, também podem ser associados em série e/ou em paralelo, gerando assim maiores níveis de potência.

A produção dessa energia depende não apenas dos arranjos dos painéis fotovoltaicos, mas também de fatores geográficos e climáticos, tais como: a latitude (posição relativa do Sol), a quantidade de nuvens cobrindo a área dos painéis, a área dos painéis e sua inclinação, temperatura, umidade e velocidade do vento local, etc. (BOLLEN & HASSAN, 2011).

3.3 Configuração de Sistemas Fotovoltaicos

A configuração básica de um sistema fotovoltaico quando conectado à rede de distribuição de energia elétrica é constituída por dispositivos ou módulos fotovoltaicos em conjunto com um inversor eletrônico, sendo este responsável por modificar a tensão contínua em uma tensão alternada e compatível. Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como:

- **Isolados:** Por exemplo, um painel fotovoltaico alimentando uma carga diretamente. Tais sistemas podem ser constituídos por um armazenador de energia (bateria), um controlador de carga (regulação da carga da bateria) e um inversor CC/CA alimentando as cargas de forma adequada.
- **Conectados à rede:** Os consumidores estão conectados à rede elétrica e a geração fotovoltaica atua como um complementar de energia. A energia gerada possui parte consumida pela carga instalada e seu excedente é exportado pela rede elétrica.

As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram as configurações descritas.

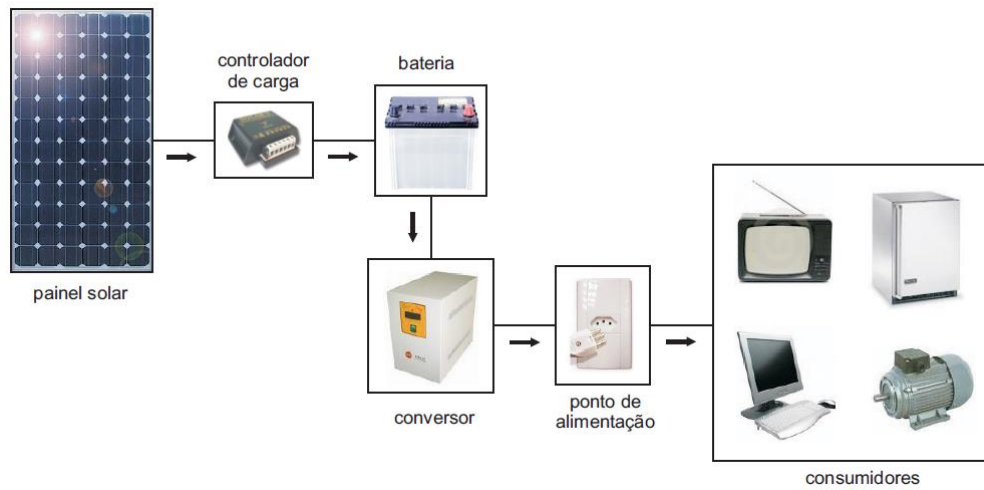


Figura 3.2 – Configuração do sistema fotovoltaico isolado (VILLALVA, 2010).

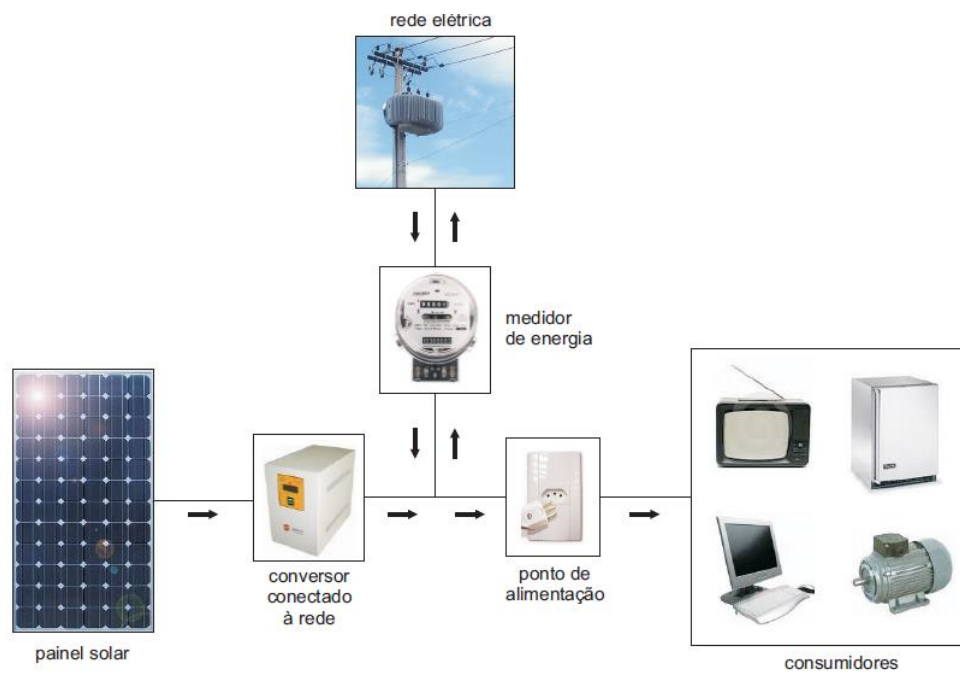


Figura 3.3 – Configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (VILLALVA, 2010).

Os sistemas fotovoltaicos, quando conectados à rede, podem ser centralizados, constituindo usinas de geração de energia elétrica ou sistemas descentralizados de geração distribuída instalados em residências, empresas e prédios públicos (VILLALVA, 2010).

3.4 Conexão de Sistemas Fotovoltaicos em Redes de Distribuição

O uso da geração fotovoltaica é bastante diversificado, podendo ser utilizada tanto em instalações residenciais ou na construção de usinas solares de grande porte. Em um cenário mundial, a geração fotovoltaica tem crescido nos últimos anos principalmente em países como a Alemanha, o Japão e a Espanha. Quanto à conexão dos sistemas fotovoltaicos pode-se dividi-la através da capacidade da planta instalada, sendo classificada como: larga, média e pequena escala (PALUDO, 2014).

Plantas de geração solar com potência acima de 1 MW são classificadas como conexões em larga escala, geralmente em usinas ou fazendas solares.

Quando a potência instalada varia entre 10 kW e 1 MW, classifica-se como conexão em média escala. Exemplos de instalações de média tensão estão em instalações como: indústrias, hospitais, escolas, comércios, etc. Um exemplo do uso de painéis em média escala encontra-se no CERIn (Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes) da UNIFEI, na cidade de Itajubá. A Figura 3.4 mostra o conjunto fotovoltaico de 15 kW_p instalado no prédio do CERIn.



Figura 3.4 – Conjunto de 15 kW_p instalado no telhado do prédio onde se localiza o CERIn.

Potências inferiores a 10 kW abrange a classificação de conexão em pequena escala, como, por exemplo, painéis fotovoltaicos de uso residencial e de pequenos centros comerciais.

3.5 Impactos da Geração Fotovoltaica na Rede de Distribuição

Quando há instalação de geração distribuída solar fotovoltaica, distúrbios em seus pontos de conexão são acarretados e conseqüentemente, afetam diferentes índices de

qualidade. Alguns aspectos serão apresentados neste capítulo visando um melhor entendimento para análise dos estudos de caso que virão a seguir.

A abordagem dos impactos envolvem os seguintes parâmetros de análise: fluxo de potência, sobretensões, penetração de harmônicos, desequilíbrio de tensão e contribuição para curto-circuito.

Autores como Shayani (2010), Esslinger & Witzmann (2010) citam as vantagens e desvantagens que serão listadas a seguir.

3.5.1 Fluxo de Potência

Através da utilização das GDs nos sistemas de distribuição haverá diversos pontos de geração que estarão interligados à rede de distribuição de energia, como por exemplo, os diversos painéis fotovoltaicos conectados nas residências. Deve-se analisar quais são os impactos trazidos, pois a rede não foi projetada para tal situação. Seria diferente se em um determinado local toda a energia fosse concentrada e assim, tratando-se de apenas um segundo local de entrada de energia (SHAYANI, 2010).

Redes elétricas convencionais consideram o fluxo de potência ativa e reativa diretamente da subestação para a carga. Em função disso há uma queda de tensão ao longo da linha o qual foi definido em Paludo (2014) e que pode ser ilustrado através da Figura 3.5. Esse fluxo unidirecional permite facilidade no dimensionamento dos transformadores de distribuição e da seção dos condutores dos alimentadores (SHAYANI, 2010).

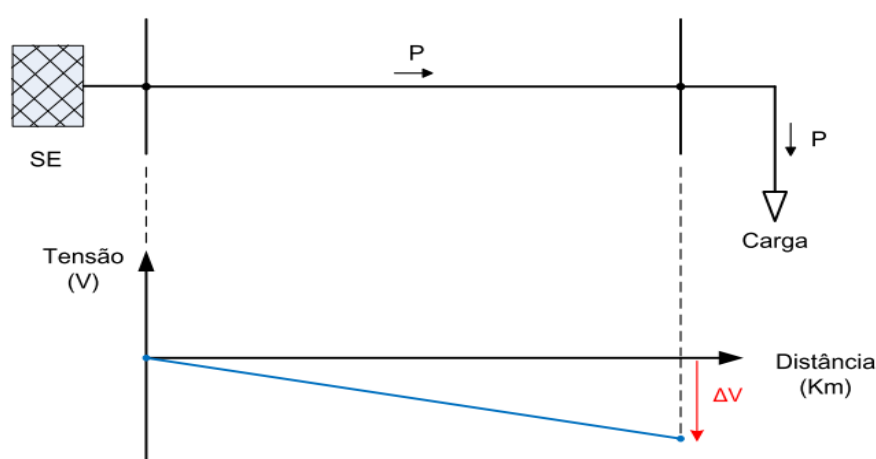


Figura 3.5 – Rede elétrica convencional (PALUDO 2014).

Entretanto, quando há penetração de geradores fotovoltaicos na rede, poderá haver uma inversão e bidirecionalidade do fluxo de potência. A título de exemplo, o PV atende o

consumo da carga à qual está conectado e o excedente de potência será injetado na rede de distribuição, alimentando outras cargas ao redor. O fenômeno é retratado a seguir através da Figura 3.6.

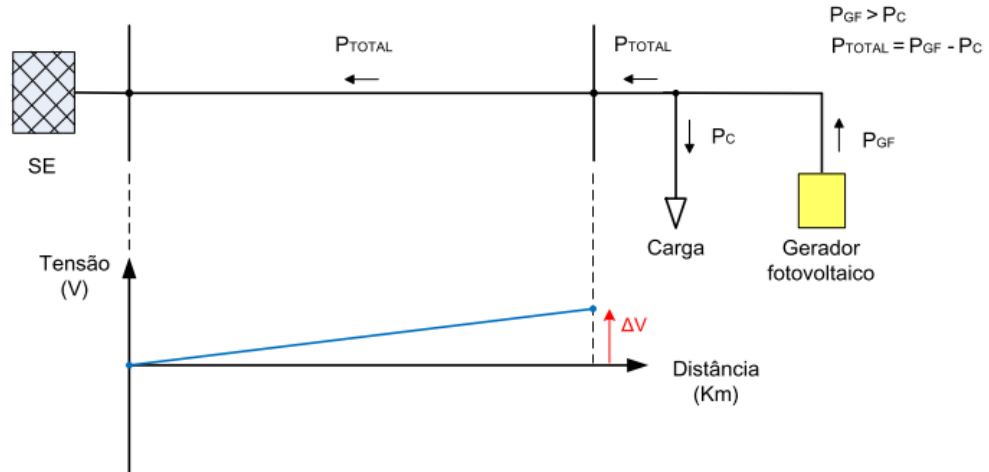


Figura 3.6 – Rede elétrica com geradores fotovoltaicos conectados (PALUDO 2014).

Devido à característica bidirecional do fluxo de potência, alguns aspectos negativos podem ser acarretados, como por exemplo, aumento da variação de tensão no ponto de conexão onde o gerador fotovoltaico está instalado e que pode ultrapassar limites nominais dos equipamentos instalados naquele ponto, acarretando possíveis prejuízos. O fluxo reverso influencia o sistema de coordenação e operação do sistema de proteção e também nos aspectos de regulação de tensão. Em um sistema de distribuição, uma análise prévia deve ser feita para avaliação de quais alimentadores sofreriam com o fluxo de potência reverso avaliando se o mesmo encontra-se nas configurações adequadas para atender os novos requisitos do fluxo de potência (ESSLINGER & WITZMANN, 2010).

Além das características do fluxo reverso de potência é necessária a discussão da utilização dos sistemas de geração fotovoltaicos para o controle da potência reativa no que diz respeito aos barramentos do sistema elétrico. Algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre este tópico (ESSLINGER & WITZMANN, 2010). Os autores propõem a existência de um gerenciamento do fornecimento e absorção da potência reativa através dos geradores fotovoltaicos. Segundo Esslinger & Witzmann (2010), seria possível aprimorar os índices de qualidade com a administração da potência reativa quando controladas as flutuações de tensões causadas pelos próprios geradores, ou seja, haveria uma diminuição do nível de desequilíbrio de tensão entre fases.

Shayani (2010) exemplifica a inversão do fluxo de potência em uma instalação de GD com um PV conectado. No exemplo citado, as demandas máximas comerciais e residenciais valem 1 (p.u) e a irradiação solar na mesma escala vale 1 (p.u). É notável pelo exemplo proposto nas Figuras 3.7 e 3.8 que com a utilização do PV durante determinados horários do dia, as potências ativas se tornam negativas, indicando que o excedente de potência produzido pelo PV é injetado na rede de distribuição proposta havendo a reversão do fluxo de potência.

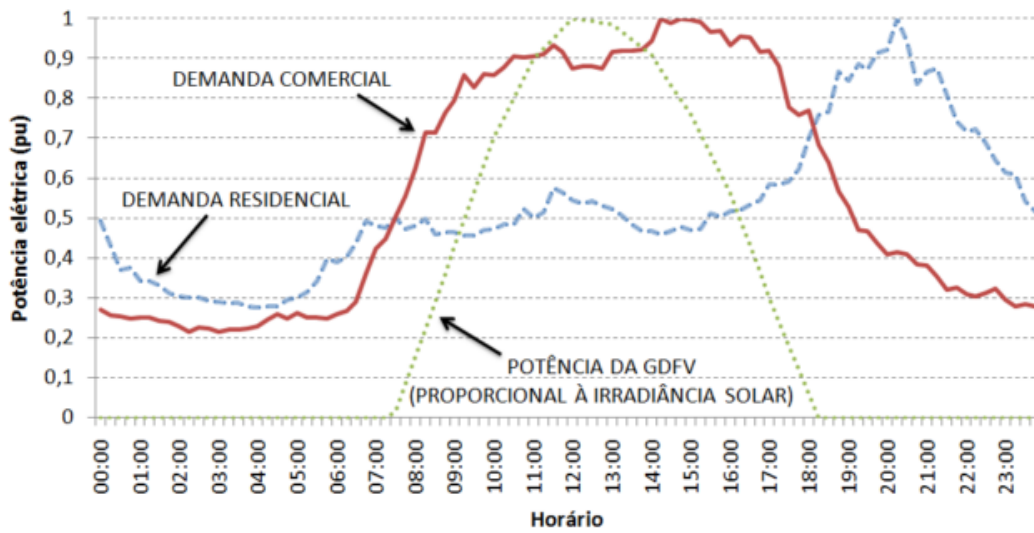


Figura 3.7 – Curvas de demanda de um sistema fotovoltaico (SHAYANI, 2010).

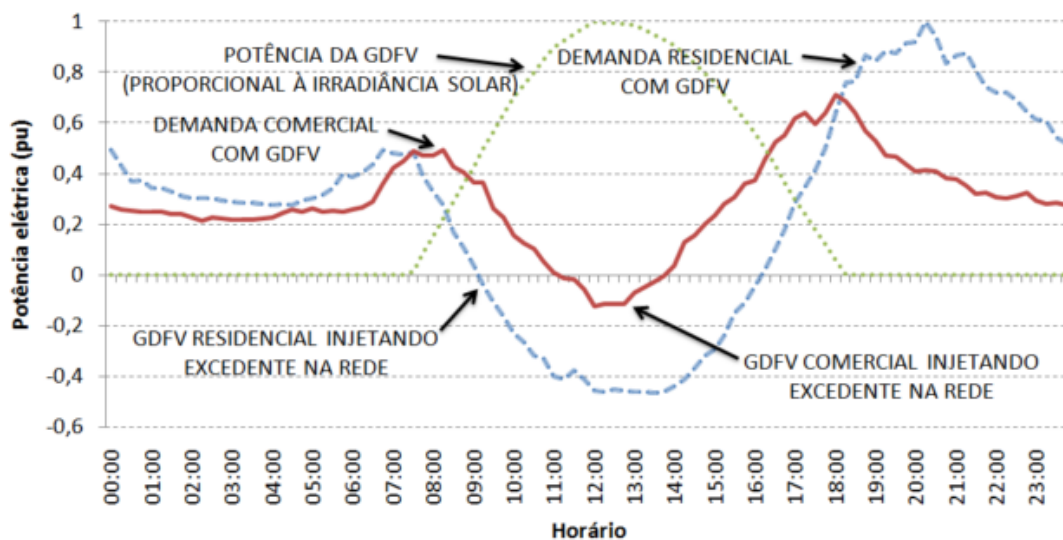


Figura 3.8 – Fluxo de potência reverso (SHAYANI,2010).

3.5.2 Variações de Tensões – Sobretensões e Subtensões

A presença de geração distribuída em um sistema de distribuição pode complicar situações com referência às variações de tensão, pois além de prejudicar os índices de

qualidade de energia fornecidas ao consumidor pode ocasionar a redução de vida útil de equipamentos atuantes em regulação de tensão, por exemplo, banco de capacitores.

É necessário que exista o monitoramento do perfil de tensão nas barras para que os limites não sejam ultrapassados. Como foi citado no item 3.4.1, quando o fluxo de potência se torna reverso, os níveis de sobretensão podem aumentar demasiadamente dependendo da quantidade de geração exportada e o índice de carga no ponto de conexão dos painéis fotovoltaicos.

Se porventura a relação entre a geração fotovoltaica e a carga instalada for alta, a elevação de tensão será um grande problema, segundo (SOLANKI, RAMACHANDRAN & SOLANKI, 2012), onde 50% da produção fotovoltaica ultrapassou os limites de sobretensão e os reguladores de tensão não foram capazes de atuar na sua correção.

Olhando por outro lado, a conexão dos painéis fotovoltaicos ao final de cada alimentador corrige os problemas de quedas de tensão habituais ao longo do trecho em questão, apresentando um caráter positivo. Ao utilizar o sistema fotovoltaico como GD, parte da potência requerida pela carga é suprida localmente, e assim, a corrente que flui pela rede de distribuição é reduzida, diminuindo a queda de tensão. Logo, os sistemas fotovoltaicos atuam como reguladores de tensão para compensação de tensão quando houver situações de carga pesada (SHAYANI, 2010).

Entretanto, na ocorrência de uma falta no ponto de conexão do gerador fotovoltaico, estes serão rapidamente desconectados devido ao sistema de proteção do inversor para anti-ilhamento e enquanto aguarda-se o reajuste do regulador de tensão para o reajuste da posição do *tap* para adequar o sistema à situação de não geração, os consumidores ficariam sujeitos a níveis de tensão abaixo dos limites permitidos levando à caracterização de afundamentos de tensão na rede (SOLANKI, RAMACHANDRAN & SOLANKI, 2012).

3.5.3 Injeção de Harmônicos

No cenário atual, devido à grande presença de dispositivos de eletrônica de potência nos sistemas de distribuição, distorções na tensão são observadas nos alimentadores (HARRISON, 2012). As linhas de um sistema de distribuição possuem características de reatância indutiva. Logo, a impedância das linhas se torna maior para a passagem de sinais de corrente em frequências elevadas, e, portanto, as componentes harmônicas enfrentam maiores impedâncias e como consequência, a circulação dessas correntes geram quedas de tensão agravantes causando a deformação no sinal de tensão da linha (MEDEIROS, 2014).

Sistemas de geração fotovoltaica são conectados à rede de distribuição através de inversores de tensão, que por utilizar eletrônica de potência, a inserção desse tipo de fonte de geração pode injetar componentes harmônicas no sistema.

Diversas normas internacionais ditam a quantidade de harmônicas que um inversor de geração distribuída pode injetar na rede elétrica. Por exemplo, a Norma IEEE Std 929 – 2000: *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*. Tal norma prescreve os limites de injeção harmônica de corrente ao se referir à IEEE Std 519 - 2015: *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*.

Mede-se a influência da presença das componentes harmônicas através da taxa individual harmônica e da taxa de distorção harmônica, seja ela para corrente, ou seja ela para tensão no ponto comum de acoplamento comum. A Norma IEEE Std. 519 dita as seguintes equações para análise da corrente, por exemplo:

$$DHI_I\% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (3.4.1)$$

onde,

$I_h\%$: Distorção harmônica individual de corrente;

I_h : Componente harmônica de ordem h [A];

I_1 : Tensão na frequência fundamental [A].

$$DHT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (3.4.2)$$

onde,

$DHT_I\%$: Distorção harmônica total de corrente;

As equações acima se aplicam à tensão de maneira análoga e serão discutidas com detalhes na Seção 5.

Todos os inversores deverão atender às normas internacionais quanto ao limite de penetração de injeção harmônica na rede elétrica, e, portanto, os conversores deverão produzir menos harmônicos do que cargas não-lineares, impactando de forma negativa a rede de distribuição onde estão conectadas (SHAYANI, 2010).

3.5.4 Desequilíbrio de Tensão

Devido à natureza desbalanceada de cargas em um sistema de distribuição e na presença de uma grande quantidade de geradores fotovoltaicos no sistema elétrico, os níveis de desequilíbrio podem elevar, por exemplo, devido a correntes elevadas no cabo de neutro e elevações de tensão (PALUDO, 2014).

Segundo Paludo (2014), os elevados índices de desequilíbrio prejudicam o funcionamento de motores de indução, dispositivos eletrônicos, equipamentos de regulação de tensão, além de geração de componentes harmônicas não características.

3.5.5 Condição de Curto-Circuito

Em sistemas fotovoltaicos os inversores são normalmente equipados com relés de subtensão e sobrecorrente para identificar uma falta e cessar sua contribuição para a corrente de curto-circuito. Por esse tipo de geração trabalhar com dispositivos eletrônicos de potência e não possuírem qualquer inércia mecânica existente em máquinas rotativas, os inversores possibilitam a rápida desconexão da rede caso haja detecção de algum distúrbio e podem ser reconectados instantaneamente, inclusive fora de fase, pois usualmente as correntes não excedem os limites dos semicondutores (SHAYANI, 2010).

3.5.6 Níveis de Potência Reativa

Alguns estudos vêm sendo discutidos sobre as vantagens da utilização dos sistemas fotovoltaicos no controle de potência reativa. Tais pesquisas são citadas em Paludo (2014). Em resumo, as pesquisas vêm explorando a consequência da introdução de geradores fotovoltaicos com finalidade do controle de parâmetros relacionados à QEE, tais como: níveis de sobretensão e fator de potência. Por exemplo, ao se administrar a potência reativa, as flutuações de tensão causadas pelos próprios geradores poderiam ser controladas e conseqüentemente, o nível de desequilíbrio de tensão entre fases seria reduzido (PALUDO, 2014).

3.6 Considerações Finais

Quando há instalação de geração fotovoltaica, os distúrbios em seus pontos de conexão acarretados foram conceituados e conseqüentemente, trazendo os diferentes impactos nos índices de qualidade. A abordagem dos impactos envolveram os seguintes parâmetros de

análise: fluxo de potência, sobretensões, penetração de harmônicos, desequilíbrio de tensão e contribuição para curto-circuito e níveis de potência reativa. Estes aspectos foram apresentados neste capítulo visando um melhor entendimento para análise dos estudos de caso que virão na sequência.

4. PROPOSTA DE METODOLOGIA DA CAPACIDADE DE HOSPEDAGEM

4.1 Considerações Iniciais

O impacto da geração distribuída pode ser quantificado utilizando um conjunto de indicadores que acusam seu desempenho. Em alguns casos, o desempenho do sistema irá melhorar após a conexão da GD ou, então, haverá impactos negativos sobre o sistema, mas este índice de desempenho não deverá ser ultrapassado (MENNITI et al, 2012). O índice de desempenho é definido como a capacidade de hospedagem que um sistema tem em abrigar gerações distribuídas respeitando os limites dos indicadores propostos (ETHERDEN & BOLLENE, 2011).

É importante salientar que o procedimento de cálculo da capacidade de hospedagem agrega contribuições no contexto de avaliação em sistemas de distribuição e também em indicadores no ponto de acoplamento comum do sistema, tais como:

- Sobretensões permitidas;
- Níveis de distorção harmônica;
- Potência de curto-circuito e o impacto nos aspectos de proteção;
- Perdas elétricas.

Nos próximos itens, o conceito de capacidade de hospedagem será aplicado através da avaliação das sobretensões permitidas e dos níveis de distorção harmônica.

4.2 Definição do Conceito de Capacidade de Hospedagem

O índice de desempenho diminui com o aumento da quantidade de geração distribuída. Para quantidades pequenas de GD, o índice permanece acima do limite mínimo de desempenho do sistema, ou seja, está em um patamar aceitável. Já para grandes quantidades de GD o desempenho torna-se inaceitável se ultrapassar o nível limite imposto. Na Figura 4.1 demonstra-se um índice de desempenho genérico da capacidade de hospedagem (ETHERDEN & BOLLEN, 2011) em função da inserção de GD.

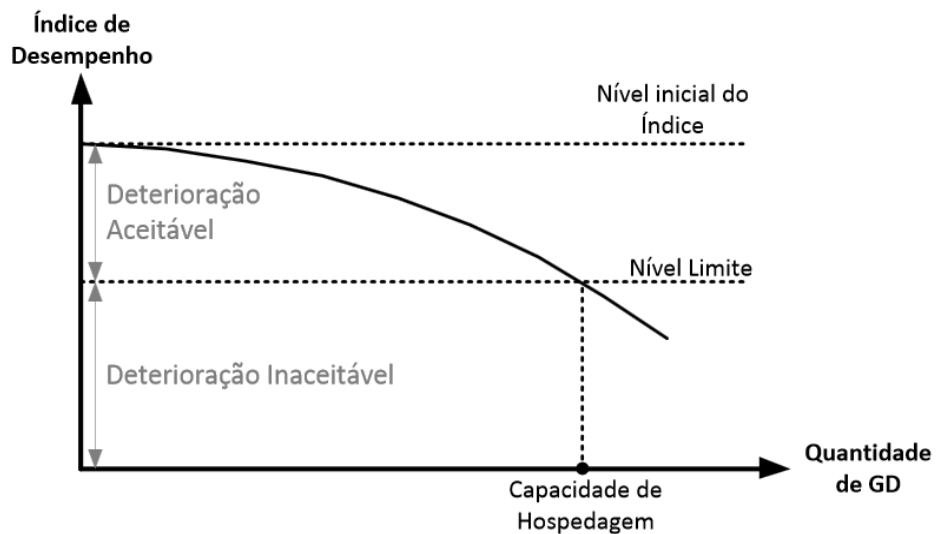


Figura 4.1 – Capacidade de Hospedagem (ETHERDEN & BOLLEN, 2011).

Desta forma, a Capacidade de Hospedagem (*Hosting Capacity*) será a quantidade máxima de geração distribuída que resulta em um desempenho inaceitável do sistema. Esta é uma questão importante, pois na área de qualidade de energia este conceito envolve alguns índices como tensão e/ou corrente desequilibradas, harmônicos, subtensões, sobretensões, etc. Ressalta-se que a ultrapassagem destes índices pode restringir a quantidade máxima de geração distribuída integrada ao sistema.

A geração solar, por exemplo, faz uso tipicamente de conversores eletrônicos como interface de acoplamento à rede, podendo ser um agravante na injeção de correntes harmônicas, resultando em uma distorção da tensão com valores não adequados.

Alguns autores (BOLLEN & HASSAN, 2011), de um modo simplificado, afirmam que a capacidade de hospedagem poderá ser determinada da seguinte forma:

1. Escolhe-se um fenômeno e, conseqüentemente, um ou mais índices de desempenho para o sistema;
2. Determinam-se limites adequados para o fenômeno escolhido;
3. Calcula-se o índice de desempenho como sendo uma função da quantidade de geração distribuída apresentada;
4. Obtém-se a capacidade de hospedagem através de análises estimadas ou experimentais.

A capacidade de hospedagem torna-se um conceito e uma ferramenta que permite uma discussão pertinente entre as diferentes partes interessadas para um equilíbrio transparente de seus interesses, a saber:

- Confiabilidade aceitável e um bom nível de qualidade da tensão entregue a todos os clientes, ou no sistema de distribuição em que estará integrado;
- Ausência das barreiras injustas contra as novas fontes de geração de energia elétrica;
- Custos aceitáveis para o operador da rede.

4.2.1 Método de Avaliação da Capacidade de Hospedagem com Relação à Margem de Sobretensão

Um dos pontos de avaliação se dá por níveis de sobretensões permissíveis ao sistema em que se está interligado. Define-se “margem de sobretensão” como a diferença entre a amplitude máxima de tensão e a subtensão limite. Neste contexto, a capacidade de hospedagem é a quantidade máxima de geração que resulta em um aumento de tensão igual à margem de sobretensão (BOLLEN & HASSAN, 2011).

No método de avaliação da capacidade de hospedagem através da margem de sobretensões permitidas determina-se o aumento da tensão máxima admissível devido à conexão de GDs. Neste contexto, a capacidade de hospedagem foi definida como a quantidade máxima de geração que resulta em um aumento de tensão igual à margem de sobretensão permitida.

A conexão de um gerador em um alimentador de uma rede de distribuição produz um mesmo aumento relativo de tensão para cada localização à montante do gerador conectado naquele ponto. Assim, o que importa é o valor mais baixo da margem de sobretensão à montante do local onde o gerador é instalado. A capacidade de hospedagem de GD neste caso pode ser calculada através de (4.2.1) (BOLLEN & HASSAN, 2011):

$$P_{max} = \frac{V^2}{R} \times \delta V_{max} \quad (4.2.1)$$

onde, $\delta V_{max} = \Delta V_{max}/V$ é a margem de tensão relativa percentual e ΔV_{max} é a margem de tensão absoluta (V).

Para uma análise qualitativa dos impactos da capacidade de hospedagem, usa-se a relação (4.2.2):

$$R = \rho \left(\frac{l}{A} \right) \quad (4.2.2)$$

na qual, ρ é a resistividade em [$\Omega \cdot m$], l é o comprimento de um cabo condutor em [m] e A é a área de sua secção transversal em [m^2]. Através da combinação de (4.2.1) e (4.2.2), pode-se fazer as seguintes inferências:

- A capacidade de hospedagem é proporcional ao quadrado do nível de tensão;
- A capacidade de hospedagem é linear à margem de sobretensão;
- A capacidade de hospedagem é inversamente proporcional à distância entre o transformador e o gerador distribuído.

Na Tabela 4.1, apresentam-se exemplos de cálculo da capacidade de hospedagem para uma tensão de 400 V com diferentes comprimentos e diferentes secções transversais de cabos de alimentação. Foi considerada uma margem de sobretensão relativa de 1% e resistividade do cobre de $1,62 \cdot 10^{-8}$ [$\Omega \cdot m$].

Tabela 4.1 - Capacidade de hospedagem por fase para tensão de 400V com 1% de margem de sobretensão (BOLLEN & HASSAN, 2011).

A [mm^2]	Comprimento do Cabo - l [m]				Capacidade
	50	200	500	2000	
10	6 kW	2 kW	1 kW	159 W	10 kW
25	16 kW	4 kW	2 kW	397 W	33 kW
50	32 kW	8 kW	3 kW	1 kW	47 kW
120	76 kW	19 kW	8 kW	2 kW	80 kW
240	152 kW	38 kW	15 kW	4 kW	120 kW

Por exemplo, um cabo com bitola de 10 mm^2 e 50 m de comprimento submetido a uma tensão de 400 V e com margem de sobretensão relativa de 1% calcula-se a capacidade de hospedagem utilizando (4.2.1) e (4.2.2):

- Cálculo da resistência do cabo usando a equação (4.2.2).

$$R = \frac{1,62 \cdot 10^{-8} \times 50}{10 \cdot 10^{-6}}$$

$$R = 0,81 [\Omega] \quad (4.2.3)$$

- Utilizando o resultado encontrado em (4.2.3) e substituindo em (4.2.1) junto aos valores de margem de sobretensão relativa de 1% e tensão de 400 V, tem-se:

$$P_{max} = \left(400^2 / 0,81\right) \cdot 0,01$$

$$P_{max} = 6 [kW]$$

Conclui-se que, para um sistema com as características apresentadas, uma potência de 6 kW causaria no máximo uma sobretensão de 1% no ponto de acoplamento comum do sistema.

4.2.1.1 Estimação Teórica da Capacidade de Hospedagem Através de Sobretensões Permitidas

Quando não houver medições disponíveis, a margem de sobretensão pode ser estimada em função do local. É recomendada a realização de medições mesmo depois de estimadas as capacidades de hospedagem teóricas (BOLLEN & HASSAN, 2011). O método utilizado pode ser definido pelas seguintes etapas:

- A partir de uma faixa adequada no nível de tensão (faixa de precisão dentro de uma tensão de referência para uma máxima variação de tensão na carga) utiliza-se o limite superior dessa faixa sendo a maior tensão na barra principal de média tensão;
- Estima-se a queda de tensão ao longo do alimentador de média tensão durante a menor carga;
- Se necessário, a queda de tensão ao longo do transformador de distribuição e ao longo do alimentador de distribuição durante a baixa carga podem ser estimadas;
- A variação de tensão devido a transformadores é adicionada (até 5%) e isso dará a maior tensão no lado de baixa tensão dos transformadores de distribuição;
- A margem de sobretensão será a diferença entre este valor e a sobretensão limite.

Para ser capaz de estimar a capacidade de hospedagem, a margem de sobretensão local deve ser conhecida (BOLLEN & HASSAN, 2011).

4.2.1.2 Estimação da Capacidade de Hospedagem de Sobretensões Permitidas Através de Medições Locais

Uma medida a longo prazo das variações de magnitude de tensão para um grande número de clientes seria o método mais adequado, entretanto poderia ser um método demorado e caro, a menos que o equipamento de medição avançado esteja disponível. Tal equipamento de medição permite o registo da magnitude da tensão e corrente a intervalos regulares, por exemplo, uma vez a cada 10 minutos (ANEEL, 2012). Esses dados são extremamente valiosos, não só para a determinação da capacidade de hospedagem, mas também para a coordenação de tensão das redes de distribuição em geral.

Os operadores de rede e clientes em vários países começaram a instalar medidores de energia que permitem o registo de tensão, corrente, potência ativa e potência reativa com uma resolução de tempo considerável, até mesmo para os clientes residenciais (BOLLEN & HASSAN, 2011).

Se o objetivo é determinar a capacidade de hospedagem do alimentador, o interesse é principalmente nos locais com a menor margem de sobretensão. A campanha de medição poderia claramente ser parte de uma campanha maior para mapear as variações de amplitude de tensão ao longo do alimentador. Quando a geração está conectada em alimentador de média tensão, a capacidade de hospedagem é obtida através da margem de sobretensão no lado secundário de um transformador de distribuição.

Ao longo do alimentador, a margem de sobretensão irá aumentar, dependendo da queda de tensão durante a carga mínima. Desta forma, a resistência total até a fonte aumentará e a capacidade de hospedagem será menor. Portanto, é aconselhável medir também em alguns locais remotos, especialmente aqueles com pequena carga mínima.

Medições de preferência devem ocorrer durante um ano inteiro para cobrir as variações sazonais. Quando existe tal dificuldade, a medição deve permanecer no local durante algumas semanas no período de carga mínima conhecido (BOLLEN & HASSAN, 2011).

4.2.2 Método de Avaliação da Capacidade de Hospedagem com Relação às Distorções Harmônicas

A capacidade de hospedagem com relação as distorções harmônicas pode ser definida como a quantidade máxima de GD ligada à rede sem que ultrapasse os limites de distorção harmônica em quaisquer componentes harmônicas individuais de tensão, apenas.

Em (SANTOS et al. 2015) o comportamento deste indicador pode ser descrito através da Figura 4.2 de forma semelhante ao que foi abordado no começo deste capítulo. O índice de destaque é a distorção harmônica permitida no ponto de acoplamento comum do sistema em questão, no qual o limite depende de normas vigentes. Vale salientar que a forma de curva apresentada depende tanto da fase harmônica da GD quanto da impedância da rede.

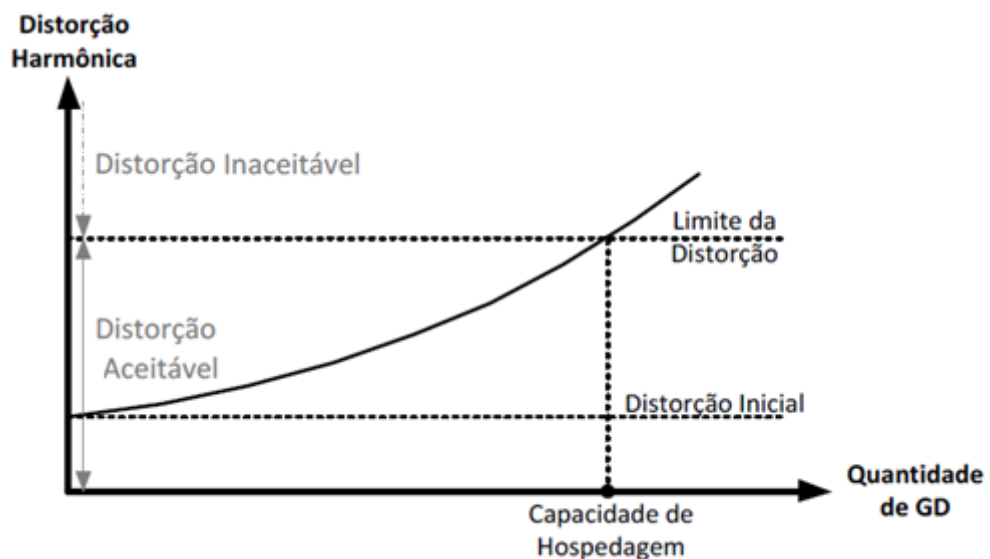


Figura 4.2 – Capacidade de Hospedagem com relação a distorção harmônica (SANTOS et al. 2015).

Para avaliação da capacidade de hospedagem harmônica, assume-se um instante de análise do sistema elétrico. Generalizando o método apresentando por (SANTOS et al. 2015) considera-se uma situação genérica para distorção harmônica de ordem h através de um equivalente Thévenin, onde \dot{Z}_{u-h} é a impedância harmônica equivalente de ordem h do sistema no ponto de conexão no barramento em análise. Logo, este ponto apresenta uma distorção harmônica de tensão verificada por \dot{V}_{u-h} que é devido às distorções harmônicas das redes a montante e a jusante. A Figura 4.3 ilustra o caso descrito anteriormente.

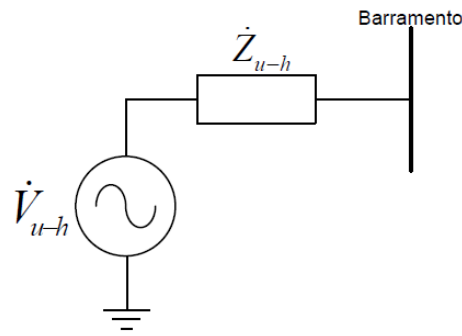


Figura 4.3 – Equivalente de Thévenin para uma ordem harmônica h (SANTOS et al. 2015).

Pode-se obter o equivalente de Thévenin do sistema da Figura 4.3 a um equivalente de Norton através de uma fonte de corrente harmônica equivalente de ordem h produzida pelo sistema em análise apresentada por \dot{I}_{u-h} . Tal corrente pode ser calculada através da equação (4.2.4).

$$\dot{I}_{u-h} = \frac{\dot{V}_{u-h}}{\dot{Z}_{u-h}} \tag{4.2.4}$$

O circuito do equivalente de Norton é apresentado através da Figura 4.4.

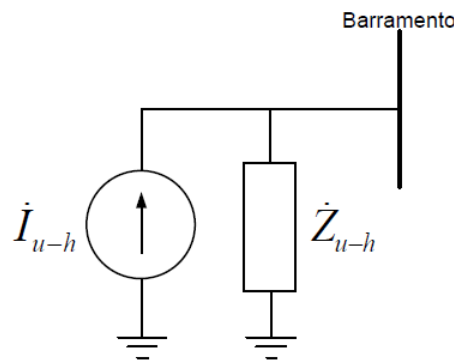


Figura 4.4 – Equivalente de Norton para uma ordem h (SANTOS et al. 2015).

Ainda em Santos et al. (2015), define-se a capacidade de hospedagem harmônica como o valor máximo da corrente harmônica de ordem h que irá conduzir a tensão harmônica para um limite de distorção máximo aceitável definido por $\dot{V}_{limite-h}$ como o valor máximo aceitável. Sendo assim, a capacidade de hospedagem harmônica de ordem h é calculada pela seguinte expressão em (4.2.5):

$$|(\dot{I}_{u-h} + \dot{I}_{HC-h}) \cdot \dot{Z}_{u-h}| = \dot{V}_{limite-h} \tag{4.2.5}$$

onde:

\dot{I}_{HC-h} é a capacidade de hospedagem da corrente harmônica de ordem h.

Em outras palavras, significa que o limite para a tensão harmônica de ordem h será atingida quando a corrente \dot{I}_{HC-h} for inserida no barramento.

Em contrapartida, supõe-se que:

$$\dot{I}_{u-h} = I_{uh} e^{j\alpha} \quad (4.2.6)$$

$$\dot{I}_{HC-h} = I_{HC} e^{j\beta} \quad (4.2.7)$$

Através de (4.2.6) e (4.2.7), pode-se escrever (4.2.8) da seguinte forma:

$$I_{HC-h} = -I_{u-h} \cdot \cos(\alpha - \beta) + \sqrt{I_{uh}^2 \cdot [\cos^2(\alpha - \beta) - 1] + \left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \quad (4.2.8)$$

onde,

Z_{u-h} é o valor absoluto da impedância \dot{Z}_{u-h} .

Assim, o valor mínimo da capacidade de hospedagem harmônica de ordem h, que é definida para o pior cenário, obtém-se quando a corrente injetada no barramento tem o mesmo ângulo de fase da distorção harmônica vinda do sistema da concessionária, ou seja, quando $\alpha - \beta = 0^\circ$. Substituindo a relação anterior, define-se o valor mínimo da capacidade de hospedagem I_{HC-h} sendo descrita em (4.2.9):

$$\begin{aligned} I_{HC-h} &= -I_{u-h} \cdot \cos(0^\circ) + \sqrt{I_{uh}^2 \cdot [\cos^2(0^\circ) - 1] + \left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\ I_{HC-h} &= -I_{u-h} \cdot 1 + \sqrt{I_{uh}^2 \cdot [1 - 1] + \left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\ I_{HC-h} &= -I_{u-h} + \sqrt{\left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\ I_{HC-h} &= -I_{u-h} + \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} \end{aligned} \quad (4.2.9)$$

Conseqüentemente, o valor máximo para a capacidade de hospedagem harmônica de ordem h, no melhor cenário acontece quando o ângulo de fase da distorção harmônica injetada

no barramento se opõe ao ângulo de fase do sistema da concessionária, isto é, $\alpha - \beta = 180^\circ$. Com isso, o valor máximo será definido por (4.2.10):

$$\begin{aligned}
 I_{HC-h} &= -I_{u-h} \cdot \cos(180^\circ) + \sqrt{I_{uh}^2 \cdot [\cos^2(180^\circ) - 1] + \left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\
 I_{HC-h} &= -I_{u-h} \cdot (-1) + \sqrt{I_{uh}^2 \cdot [1 - 1] + \left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\
 I_{HC-h} &= I_{u-h} + \sqrt{\left(\frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}}\right)^2} \\
 I_{HC-h} &= I_{u-h} + \frac{V_{limite-h}}{Z_{u-h}} \tag{4.2.10}
 \end{aligned}$$

Para ambos os casos, não é preciso conhecer os ângulos de fase das correntes harmônicas inseridas nos barramentos. Consequentemente, haverá um intervalo da capacidade de hospedagem que será calculado através das equações (4.2.9) e (4.2.10) em que é dado o limite inferior e o limite superior da corrente harmônica de ordem h, respectivamente para o intervalo encontrado.

Fica claro que é necessário saber o valor aproximado das impedâncias harmônicas do sistema em questão, e metodologias e medições específicas necessárias são abordadas em (SANTOS et al. 2015). Nesta dissertação, estes procedimentos não serão explorados com detalhes.

4.2.2.1 Procedimento para a Estimação da Capacidade de Hospedagem Harmônica para o pior e melhor cenário

O trabalho de Santos et al (2015) apresenta os procedimentos necessários para aplicabilidade na definição do melhor e pior cenário:

1. Ao selecionar um barramento para análise, defina a máxima distorção de tensão que será obtida por meio de informações e códigos de redes locais ou normas regulamentadoras;
2. Determinar a impedância harmônica equivalente de ordem h do sistema da concessionária;
3. Fazer a medição da distorção harmônica de tensão no barramento;

4. Calcular a corrente harmônica de ordem h equivalente produzida pelo lado da concessionária através da equação (4.2.5). Se não houver distorção no barramento, esta corrente será nula;
5. Através da impedância da fonte e da distorção harmônica medida, calcula-se a magnitude da capacidade harmônica de ordem h para o pior cenário usando (4.2.9) e para o melhor cenário usando (4.2.10).

4.3 Considerações Finais

Foram apresentados os procedimentos de cálculo da capacidade de hospedagem para contribuições no contexto de avaliação em sistemas de distribuição e também em indicadores no ponto de acoplamento comum do sistema, tais como, sobretensões permitidas e níveis de distorção harmônica de tensão individual;

No próximo capítulo o conceito de capacidade de hospedagem será aplicado através da avaliação das sobretensões permitidas e dos níveis de distorção harmônica dentro do campus da UNIFEI e do CERIn.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Considerações Iniciais

Esse capítulo apresenta resultados de medição e simulação de um sistema real e tem como objetivo principal aplicar as metodologias propostas no capítulo 4.

Os sistemas reais em questão tratam da instalação do PV no CERIn e de simulações prévias no que diz respeito à expansão deste sistema de geração e também de novos PVs no campus, conectados no alimentador vindo do ponto de entrega na subestação de entrada da UNIFEI que supre o transformador de distribuição do CERIn e outros edifícios dentro do campus. Os dados utilizados fazem parte da medição realizada no próprio CERIn. As simulações são realizadas em parte da rede de distribuição da UNIFEI com relação à expansão de outros sistemas fotovoltaicos.

O estudo é estruturado em três cenários. No primeiro cenário, têm-se os resultados de medição no prédio do CERIn totalizando uma semana de medição seguindo o protocolo de medição do PRODIST - MÓDULO 8 (2015) com o PV ligado. Em um primeiro momento, foram analisados os índices que caracterizam os fenômenos de QEE através dos valores de referência. Em seguida, fez-se a análise da capacidade de hospedagem segundo a metodologia de sobretensões permitidas apresentadas no capítulo 4.

No segundo cenário, por sua vez, têm-se uma análise da capacidade de hospedagem com relação às distorções harmônicas ao aplicar os conceitos apresentados no capítulo 4 através de simulações computacionais. A realização das simulações aconteceram através do *software* comercial *SKM-PTW*. No cenário atual, a potência instalada de PVs no CERIn é de 15 kW_p e futuramente serão adicionados mais 15 kW_p , totalizando 30 kW_p . É interessante mencionar que existe o interesse do CERIn em expandir desta potência para 45 kW_p . Por fim, no terceiro cenário, houve a realização de uma simulação na qual analisou-se o impacto da conexão de várias gerações fotovoltaicas no campus da UNIFEI, ao longo do alimentador vindo da cabine de entrada da CEMIG. Desta forma, será analisada qual seria a capacidade de hospedagem, vista no lado de 13,8 kV da UNIFEI, em função dessas diversas inserções de geração distribuída no sistema de distribuição deste campus universitário.

A Figura 5.1 mostra um esquema representativo do diagrama unifilar do sistema de distribuição do campus da UNIFEI para melhor entendimento das características da rede que serão apresentadas posteriormente. O sistema de distribuição da UNIFEI é composto por 4

alimentadores de 13,8 kV que alimentam o campus, contendo 25 transformadores com tap de 13,8 kV para 220 V, com variadas potências nominais na faixa de 45 kVA até 300 kVA.

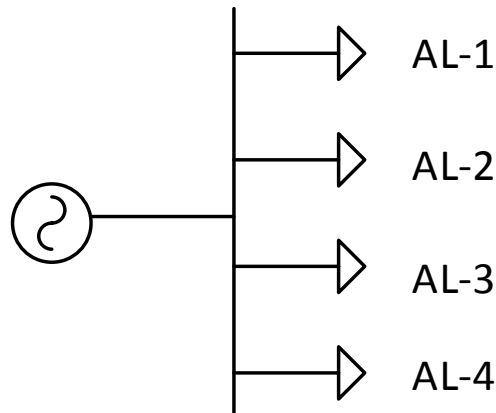


Figura 5.1 – Diagrama unifilar representativo do sistema de distribuição da campus da UNIFEI.

Por fim, o objetivo deste trabalho é simular e analisar a inserção da geração fotovoltaica no prédio do CERIn e dizer quais seriam as consequências e quanto de GD poderia ser alocada dentro do campus da UNIFEI sem causar grandes impactos nos índices de QEE desta rede elétrica.

5.2 Escolha do **Software** de Simulação e Medição

Para realizar as medições de qualidade de energia elétrica foram utilizados dois medidores do fabricante *DRANETZ* que se caracterizam pela alta resolução e capacidade de monitorar eventos na rede nos âmbitos de qualidade do produto, *loadflow* e transitórios em sistemas elétricos.

Os modelos utilizados são da família *Power Guide 4400* e *Power Explore Px5* que atendem as normas IEC 61000-4-15 e IEC 61000-4-30 classe A e EN50160 com configurações múltiplas em corrente alternada e corrente contínua e comunicação via RS 232, Ethernet e USB. As Figuras 5.2 e 5.3 são fotos de ambos os medidores e seus dados de catálogo fornecido pelo fabricante se encontram no ANEXO C.



Figura 5.2–DRANETZ Power Guide 4400.



Figura 5.3–DRANETZ Power Explore Px5.

O *software* de leitura dos medidores da marca *DRANETZ* é o *DRAW-VIEW 6*, um *software* baseado no *Windows* que permite de maneira simples e rápida a visualização e análise dos dados de monitoramento, com facilidade de acesso e opções personalizáveis que atendem as necessidades para cada projeto. O *software* possui a facilidade da exportação dos dados para o *Microsoft EXCEL* [DRANETZ].

O *PTW (Power*Tools for Windows)* é um *software* para projetos e análise de sistemas elétricos de potência, graficamente interativo e com poderosa base de dados que eficientemente organiza, processa e apresenta os resultados. No estudo, cujo objetivo é a análise harmônica, o *software* utilizado é o *HI_WAVE* o qual ajuda a examinar e reduzir as distorções harmônicas, uma vez que com o uso deste *software* pode-se examinar esses problemas antes da operação de um novo sistema de potência. No caso de sistemas existentes, pode-se fazer o estudo com o *HI_WAVE* e assim analisar as possíveis correções antes que se construa a instalação. A análise da distorção harmônica pode ser realizada em todos os pontos

e ramos do sistema de potência. O *software* mostra gráficos das formas de onda das distorções harmônicas, suas magnitudes, ângulos e possui em sua biblioteca um modelo exato de quase todas as fontes harmônicas que são encontradas em seu sistema. Vale ressaltar que o *HI_WAVE* usa métodos de matriz esparsa e injeção de corrente para obter soluções exatas e rápidas. As correntes harmônicas são injetadas no sistema como fontes harmônicas, de modo permitir a análise das respostas do sistema durante a simulação em uma faixa de frequências (PTW, 2012).

A escolha do *software* PTW foi atribuída à sua eficácia diante de uma grande quantidade de barras e também pela capacidade de processamento. Além disso, também foi escolhido diante da facilidade na interface gráfica para modelagem do sistema. Algumas caixas de diálogos são mostradas no ANEXO A para exemplificar as entradas de dados no sistema e também para o procedimento de simulação, respectivamente.

5.3 Instalação dos Painéis Fotovoltaicos no Centro de Excelência Em Redes Elétricas Inteligentes (CERIn) no Campus da UNIFEI

5.3.1 O Campus da Universidade Federal de Itajubá

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) localizada em Itajubá-MG é uma conceituada universidade principalmente nas áreas de Engenharia, tais como mecânica, elétrica, produção e outras áreas. Diversos projetos estão sendo desenvolvidos dentro do espaço físico da universidade visando que a rede elétrica local de distribuição se torne uma microrede de energia e, posteriormente, um “laboratório vivo” com relação à produção de energias limpas e sustentáveis.

O primeiro projeto implantado está localizado no CERIn (Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes), projeto destinado à instalação de painéis fotovoltaicos para conexão em baixa tensão (220/127V). O CERIn está instalado em um edifício de três andares com sistema elétrico conectado à média tensão (13,8kV).

A Figura 5.4, através do *Google Earth*, mostra o campus da UNIFEI e indica a localização do CERIn.

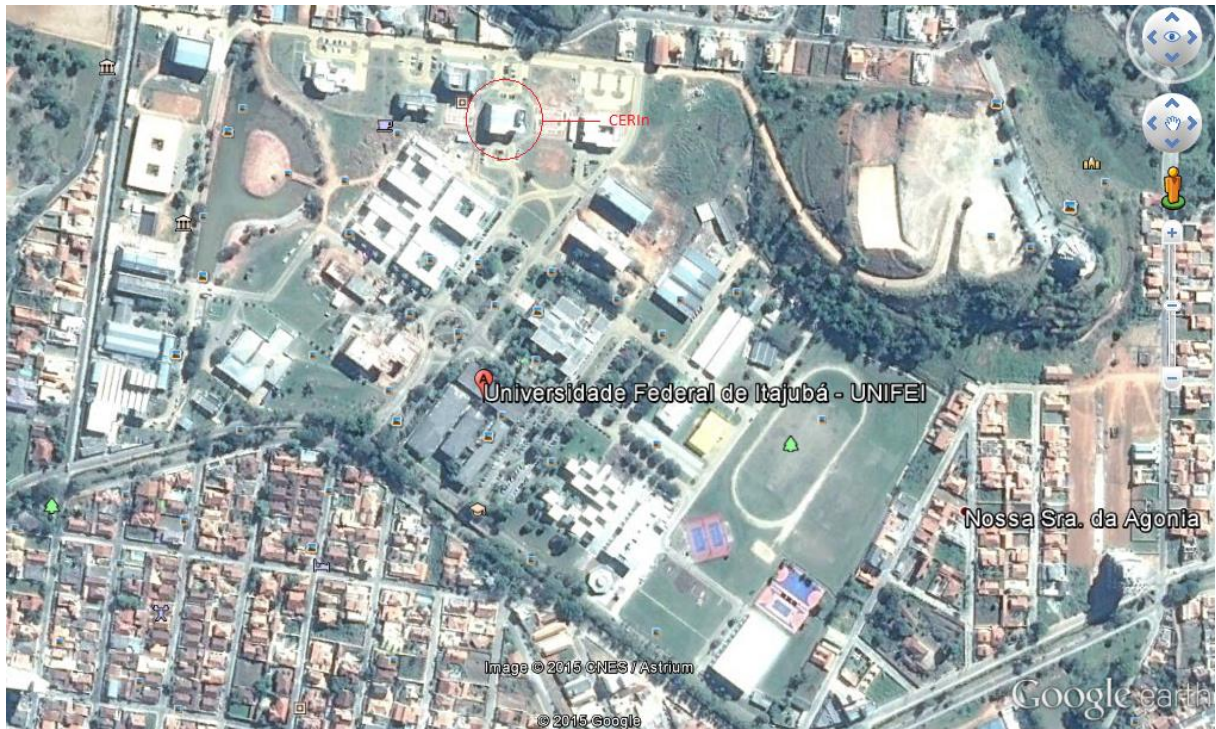


Figura 5.4 – Universidade Federal de Itajubá pelo Google Earth.

Para futuras análises do comportamento da inserção de novas fontes de energia no campus da UNIFEI, efetuou-se um levantamento dos dados referentes à totalidade de carga instalada no campus universitário. Os dados referentes ao sistema encontram-se na Tabela 5.1 e os dados referente às cargas instaladas no campus estão na Tabela 5.2

Tabela 5.1 – Dados do Sistema de Entrada da UNIFEI.

Dados do Sistema da CEMIG	
Tensão Nominal [kV]	13,8
Potência de Curto-Circuito trifásica [MVA]	178,95
Carga Instalada [kVA]	1419,25
Impedância dos transformadores (Valor aproximado)	4%
Demanda atual [kW]	800
Demanda calculada [kW]	878,96

Tabela 5.2–Estimativa dos Dados de Carga.

Descrição	Quantidade	Potência Unitária [kW]	Potência Total [kW]
Micro-computadores	965	0,15	114,75
Impressoras	334	0,1	33,4
Geladeiras e bebedouros	63	0,2	12,6
Iluminação externa			99
Ar condicionado	92		203
Iluminação interna	1100	0,1	110
Motor ½ CV	2	0,57	1,14
Motor de ¼ CV	3	0,33	0,99
Motor 1 CV	5	1,13	5,65
Motor 2 CV	4	1,94	7,76
Motor 3 CV	6	2,97	17,82
Motor 4 CV	1	3,82	3,82
Motor 5 CV	6	4,78	28,68
Motor 7,5 CV	2	6,9	13,8
Motor 10 CV	6	9,6	57,6
Motor 15 CV	1	13,63	13,63
Motor 20 CV	1	18,4	18,4
Motor 30 CV	23	26,93	619,39
Cabos e fios			27,82
Total			1419,25

Atualmente a UNIFEI possui 25 transformadores de potência (13,8 kV–0,22/0,127 kV) em seus edifícios. Uma demanda de 800 kW foi contratada da CEMIG para suprimento das cargas elétricas no campus.

5.3.2 Os Painéis Fotovoltaicos Instalados no CERIn

O sistema instalado é composto de 62 painéis fotovoltaicos divididos em dois conjuntos de 31 painéis cada e que possuem capacidade de produção total de 15 kW_p /dia, 2 inversores, 1 autotransformador (400/330 – 220/127 V), estruturas metálicas, sensores e equipamentos de monitoramento. Detalhes técnicos do sistema fotovoltaico são mostrados no ANEXO A.

O sistema em pleno funcionamento tem capacidade de geração em torno de 22,2 MWh/ano (RENOVA, 2015). A Figura 5.5 mostra a entrada do prédio do CERIn e a Figura 5.6 apresenta foto de um dos conjuntos de 31 painéis fotovoltaicos instalados no telhado do CERIn.



Figura 5.5 – Centro de Excelência em Redes Elétricas Inteligentes (CERIn).



Figura 5.6 – Conjunto de 31 painéis fotovoltaicos no CERIn.

Na Figura 5.7 têm-se os resultados estimados da irradiação solar (kWh/m^2) incidente no local e a temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$) referente ao ano de 2013 (RENOVA, 2015).

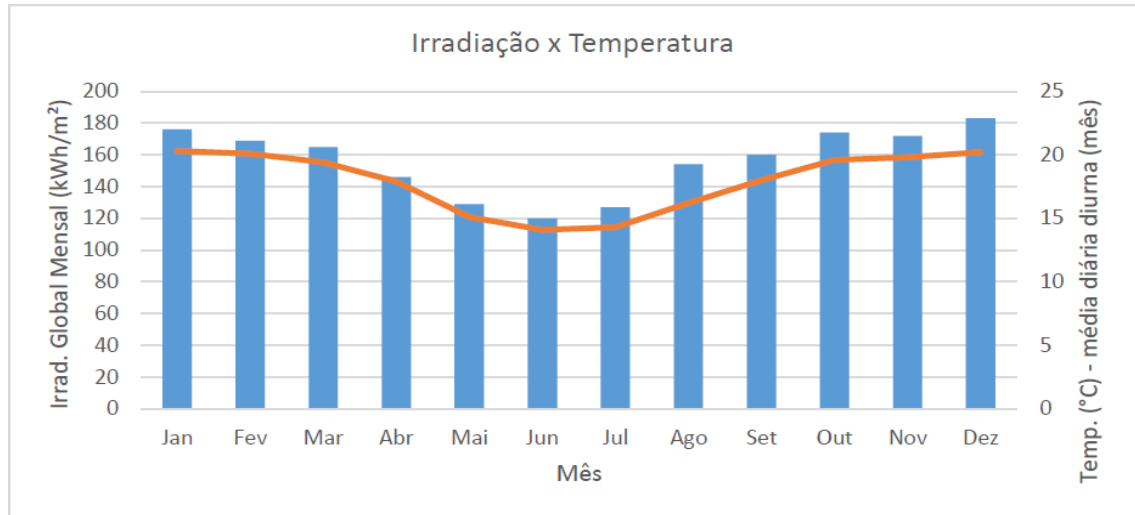


Figura 5.7 – Dados de irradiação solar local referente a 2013 (RENOVA, 2015).

Com base nos dados de irradiação solar previstos, a estimativa de produção energética anual do sistema fotovoltaico é de 1.480 kWh para cada kW_p instalado. Para o sistema de 15 kW_p de potência instalada, a produção anual de energia será de 22,2 MWh/ano , correspondendo à média mensal será de 1.850 $\text{kWh}/\text{mês}$. Através da Figura 5.8 apresenta-se a produção mensal estimada do sistema descrito.

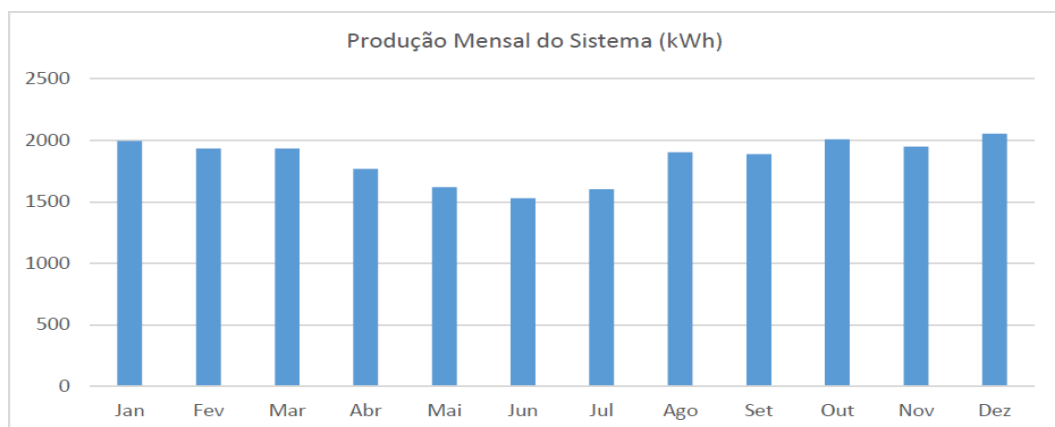


Figura 5.8 –Estimativa da produção de energia solar pelo PV (RENOVA, 2015).

Através de uma análise do local por meio de fotos de satélite e referências do projeto, existe no local uma disponibilidade para instalação de 60 kW_p de potência, considerando apenas a área útil do telhado do CERIn.

A Figura 5.9 ilustra os dois conjuntos de inversores CC/CA da instalação, sendo um para cada conjunto de 31 placas fotovoltaicas. Um medidor de energia digital bidirecional registra os fluxos eventualmente injetados no sistema de 13,8 kV da UNIFEI, quando houver excedente de geração em relação ao consumo interno do CERIn.



Figura 5.9 – Conjunto de 2 inversores para o PV do CERIn (FRONIUS, 2015).

5.3.3 Pontos de Medição na SE do CERIn através de Analisadores de QEE

Na Figura 5.38 apresenta-se o diagrama unifilar onde são mostrados os locais onde os analisadores de QEE foram conectados na SE do CERIn. O prédio do CERIn possui um transformador de distribuição de 150 kVA com nível de tensão de entrada de 13,8 kV e tensão de saída de 220 V, característica a seco e impedância percentual em torno de 4,16% suprindo dois quadros de distribuição de cargas. A Figura 5.10 ilustra o transformador instalado no prédio.



Figura 5.10 – Transformador a seco de 150 kVA do CERIn

Os medidores foram instalados em dois locais dentro da SE. Os locais foram:

- Saída do painel fotovoltaico, após o autotransformador que está conectado à barra de 220 V do prédio;
- Na BT do transformador de distribuição;
- Os locais de medição estão sendo mostrados no unifilar da Figura 5.38 da seção 5.4.

A justificativa dos locais se dá pela possibilidade de ampla análise da potência entregue pelo painel fotovoltaico e análise da bidirecionalidade do fluxo de potência no lado de BT do transformador de distribuição, podendo assim, se investigar fenômenos de DTT de tensão e corrente, variação RMS da tensão na barra de 220V.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a conexão dos analisadores de QEE em ambos os locais descritos, respectivamente.



Figura 5.11 – Medição de qualidade de energia na saída do PV.



Figura 5.12 – Medição de qualidade de energia na saída do transformador de distribuição do CERIn.

5.3.4 Avaliação dos Impactos da Geração Solar do CERIn na Qualidade de Energia

As grandezas principais medidas foram registradas seguindo o protocolo de medição do (PRODIST) Módulo 8, o qual sugere que o conjunto de medidas para geração dos indicadores individuais devem compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos de integração consecutivos de 10 minutos, durante 168 horas (uma semana). Os valores registrados possuem seus valores máximos, médios e mínimos para cada intervalo de medição.

Tais grandezas medidas através dos medidores de QEE *DRANETZ*, foram:

- Potência ativa;
- Potência reativa e aparente;
- Fator de potência;
- Frequência;
- Tensão RMS;
- Corrente RMS;
- Distorção harmônica total de tensão (DTT);
- Distorção harmônica Individual de tensão (DTI);
- Distorção harmônica total de corrente (DHI-I);
- Distorção harmônica Individual de tensão (DHT-I).

Ao longo do período de medição foram observadas diversas situações, dentre elas, períodos de grande geração ou pouca geração de energia, além da variação no consumo no prédio do CERIn no período observado de 2 semanas de medição compreendido entre os dias 08/04/2015 e 22/04/2015 por razões de confiabilidade das medições. Em razão disso, escolheu-se a perspectiva de observação dos fenômenos durante 7 dias de medição seguindo o protocolo proposto no PRODIST e a análise para o dia onde se teve maior geração dentro do período analisado.

Durante o período de medição não se observou nenhuma distúrbio no funcionamento dos equipamentos, apenas algumas variações na rede elétrica da UNIFEI de causa desconhecida e que serão comentadas posteriormente.

5.3.4.1 Análise da Potência Gerada, Consumida e Exportada

Nas Figuras 5.13 e 5.14 são mostrados os resultados das medições realizadas na subestação do CERIn no período de 1 semana (08/04/2015 a 15/04/2015) e no dia 09/04/2015, respectivamente. Vale ressaltar que os inversores são ajustados para injetar corrente com fator de potência unitário.

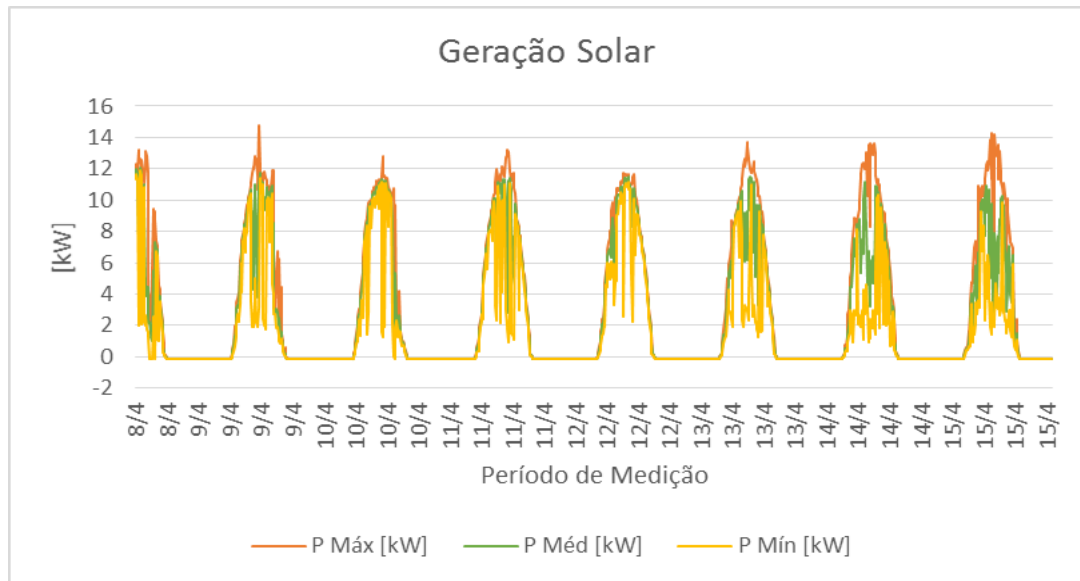


Figura 5.13 – Geração fotovoltaica durante a semana de 08/04/2015 a 15/04/2015.

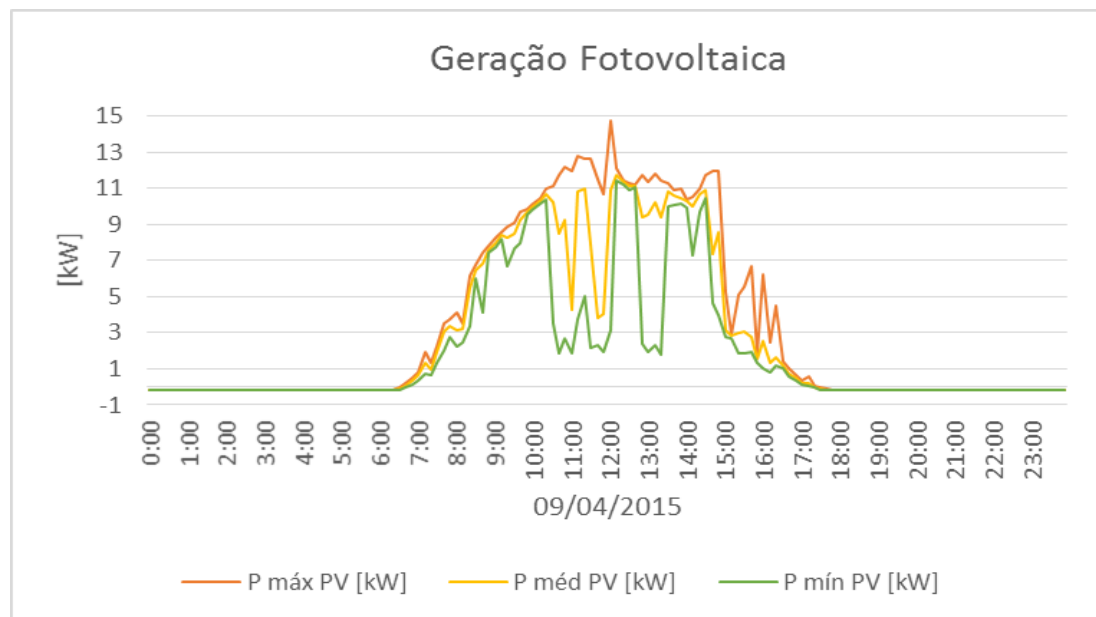


Figura 5.14 – Geração fotovoltaica no dia 09/04/ 2015.

Nota-se pela Figura 5.13 que no período de medição compreendido, a maior média de produção ocorreu no dia 09/04/2015 onde também houve o maior pico de geração solar. A geração solar nos painéis no dia 09/04/15 teve início em torno das 06h00 da manhã, quando o dia começa a clarear até por volta das 17h40, chegando a um pico de $14,75 kW_p$ em torno das 12h00 durante o período de medição mostrado na Figura 5.14.

As Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 apresentam as máximas, médias e mínimas, respectivamente, de cada fase e percebe-se que existe um desequilíbrio entre fases no período de geração. Este desequilíbrio se dá pelas características do inversor devido às variâncias que acontecem durante o dia com a passagem de nuvens, irradiação solar, características dos ventos, diversidade da demanda das cargas e outros fenômenos.

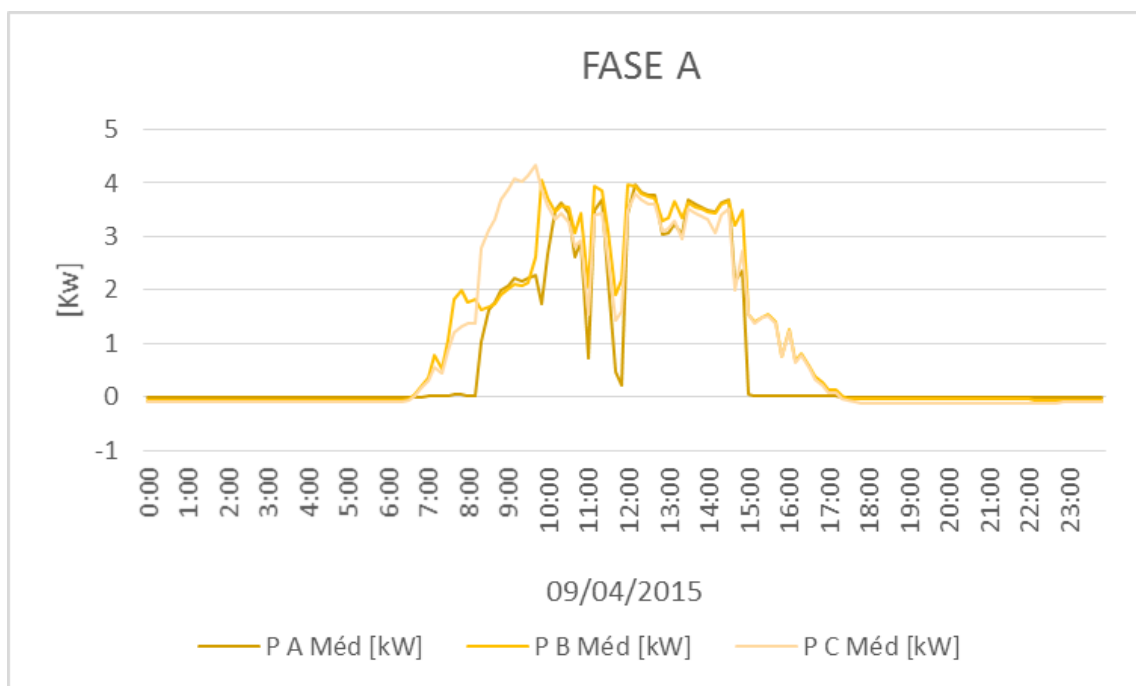


Figura 5.15 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase A.

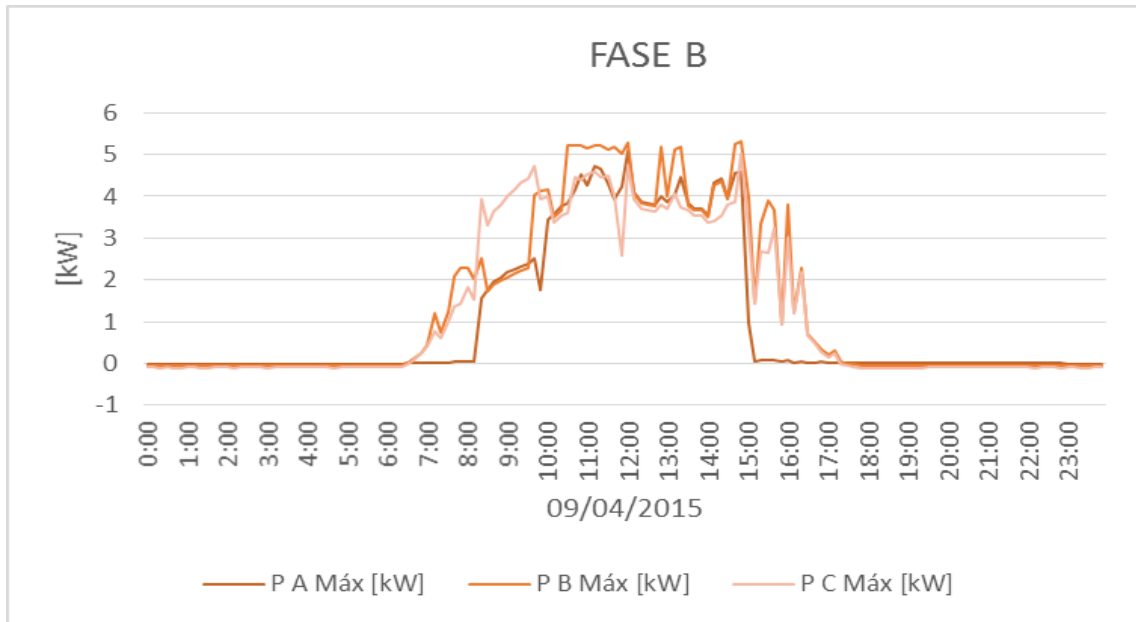


Figura 5.16 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase B.

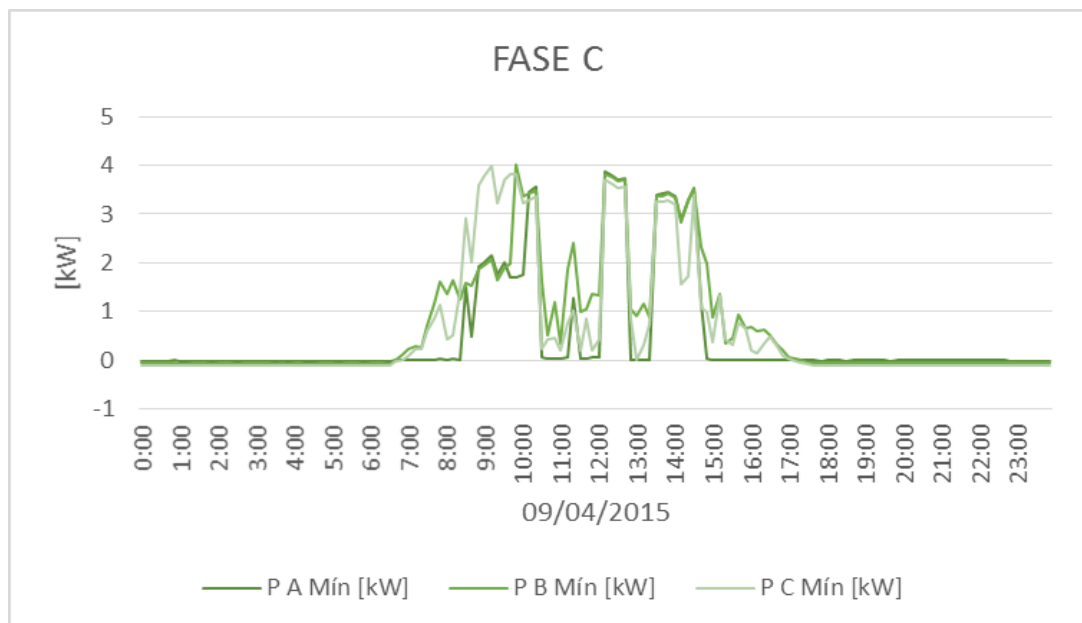


Figura 5.17 – Geração fotovoltaica máxima, média e mínima da fase C.

Através da Figura 5.18 observa-se a bidirecionalidade do fluxo de potência durante a semana de medição.

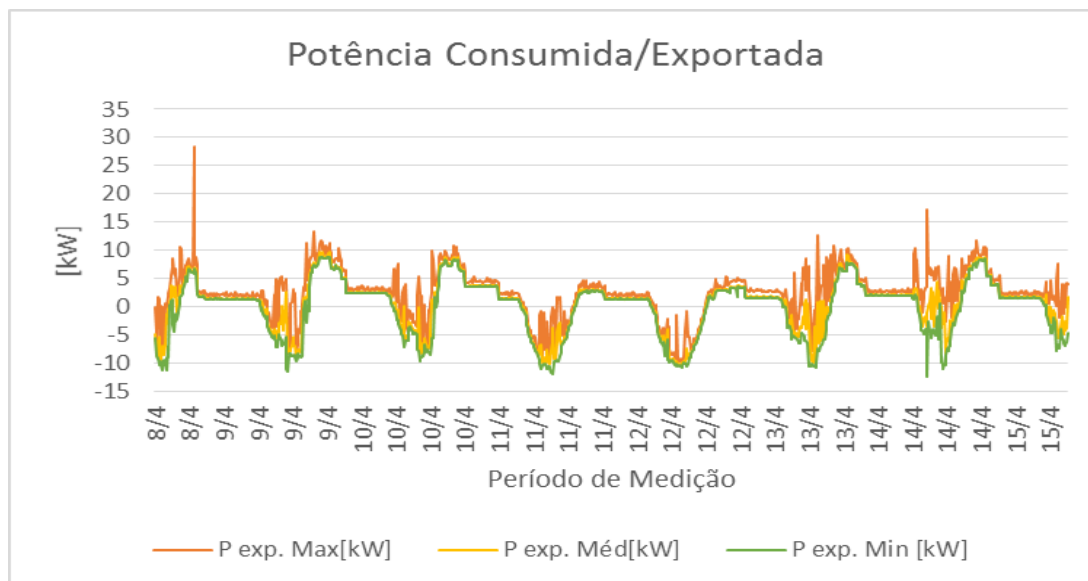


Figura 5.18 – Medição do fluxo de potência reverso durante a semana de medição.

Devido à semana ensolarada, picos de produção de energia da ordem de $12 kW_p$ foram atingidos. Detalhadamente, avalia-se que em alguns dias da semana, por exemplo no dia 09/04, houve uma pequena importação de energia da rede da CEMIG, em torno de 4 kW. Estes períodos de importação foram ocasionados pela baixa de produção de energia solar devido à passagem de nuvens. Fica evidente que aconteceram dias em que nenhuma parcela de energia foi importada, ou seja, há uma parcela da produção que foi consumida pelo CERIn e o restante exportada ao campus, como, por exemplo, no dia 10/04. Os dias 11/04 e 12/04 representam o final de semana onde há pouca movimentação no CERIn e, conseqüentemente, pouca demanda. Neste caso houve um espelhamento entre a energia produzida e a energia exportada totalizando praticamente 100% de exportação.

A título de comparação, plotou-se na Figura 5.19 o gráfico delimitando as curvas de geração e de demanda do CERIn em seus valores máximos, médios e mínimos.

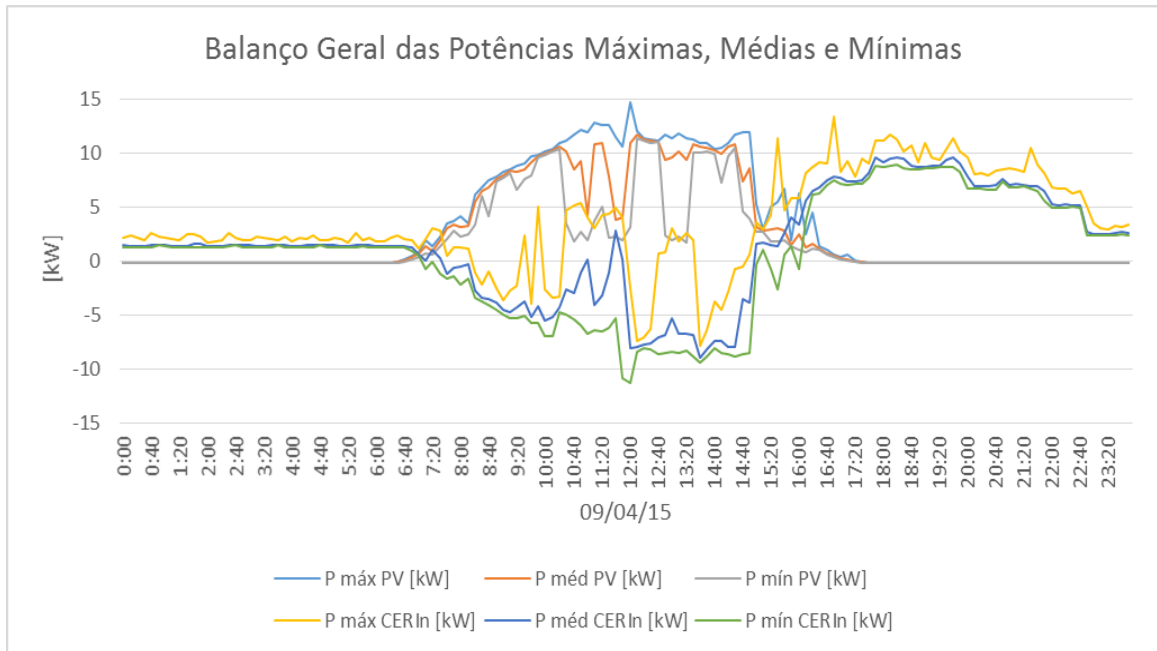


Figura 5.19 – Comparação entre geração e demanda do CERIn através do fluxo de potência no dia 09 de Abril de 2015.

A Figura 5.20 traça a curva de energia total produzida pelo painel fotovoltaico juntamente com a parcela consumida pelo CERIn. Nota-se que pela definição de energia, sendo esta a integral da potência, é uma curva crescente ao longo do tempo. A curva laranja representa a energia produzida pelo painel fotovoltaico e a curva amarela a energia consumida pelo do CERIn.

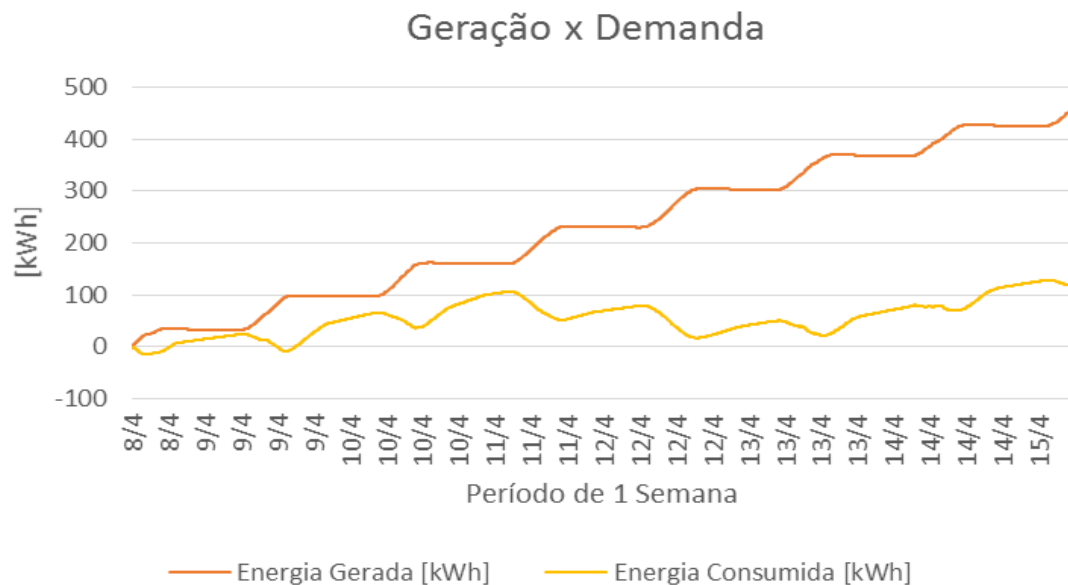


Figura 5.20 – Energia produzida pelo PV e e energia consumida pelo CERIn.

A região que representa a diferença entre as curvas é a energia exportada para o campus no período de medição citado. Observa-se um ganho maior no período noturno em que a maior parte da parcela de energia é consumida, pois ainda não existe no CERIn um sistema de armazenamento devido à complexidade que existe entre a coordenação da rede com o sistema armazenador (No-Break). A Figura 5.21 representa a diferença entre essas áreas para discriminar a contribuição do painel fotovoltaico ao campus da UNIFEI.

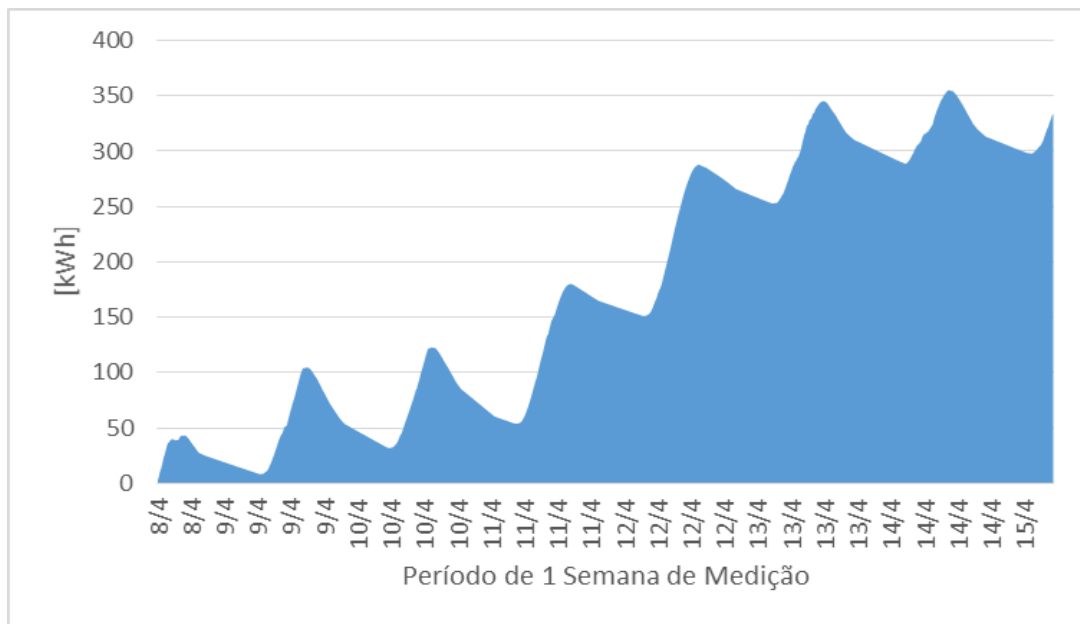


Figura 5.21 – Contribuição do PV ao campus durante a semana de medição.

5.3.4.2 Análise do Desequilíbrio de Tensão

Segundo o PRODIST Módulo 8 (2015) o desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado à alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Portanto, tem-se que o valor do desequilíbrio de tensão deve ser igual ou inferior a 2% e seu cálculo se deve ser feito através das seguintes expressões:

$$FD\% = 100x \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5.3.1)$$

onde,

FD% é o fator de desequilíbrio [%];

β depende das tensões entre fases do sistema e pode ser calculado através da equação (5.3.2):

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (5.3.2)$$

Vale ressaltar que, a fim de eliminar possíveis efeitos das componentes de sequência zero, as medições devem ser realizadas para as tensões fase-fase, conforme explicitado na equação (5.3.2).

A Figura 5.22 apresenta o desequilíbrio de tensão medido na barra durante a semana de medição.

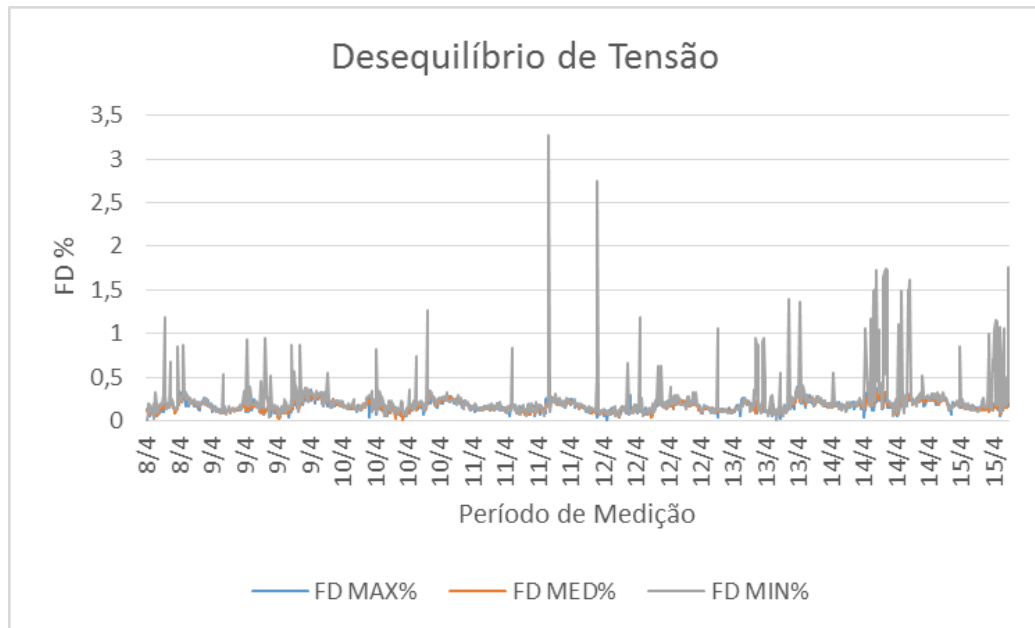


Figura 5.22 – Desequilíbrio de tensão durante a semana de medição.

Nota-se que em alguns momentos da semana de medição o desequilíbrio de tensão ultrapassou o limite estabelecido pelo PRODIST. Entretanto, na maior parte do tempo não ultrapassou 1%. Vale ressaltar, também, que estes eventos não foram provocados pelo PV, e sim por fenômenos ocorridos na rede elétrica do campus da UNIFEI de causa desconhecida. Na Figura 5.23 apresenta-se o desequilíbrio de tensão medido na barra no dia 09/05/15.

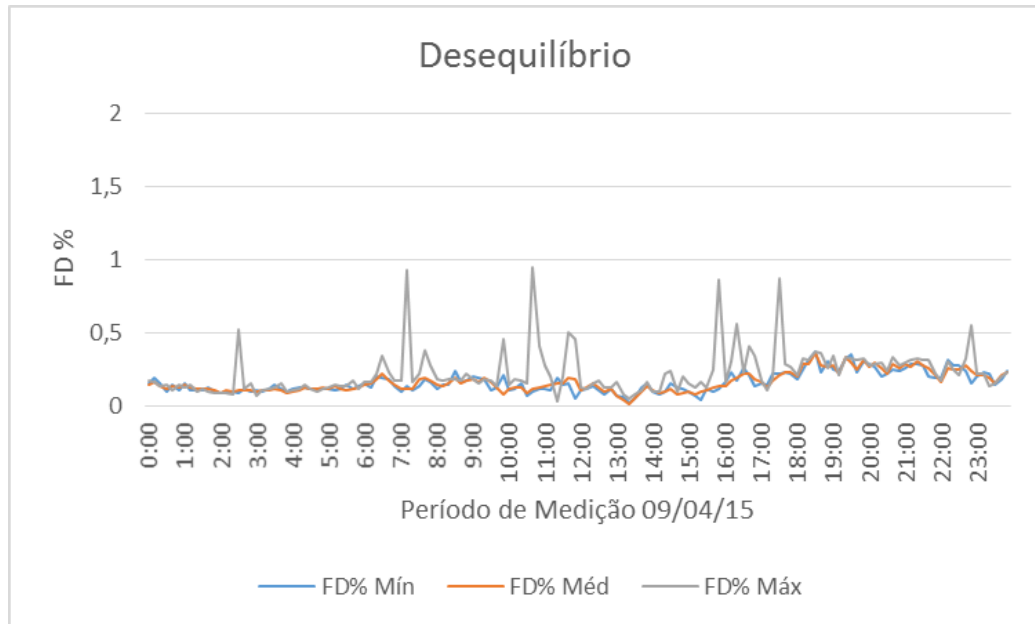


Figura 5.23 – Desequilíbrio de tensão no dia 09 de Abril de 2015.

5.3.4.3 Análise da Distorção Harmônica Total de Tensão

Para análise da distorção harmônica total de tensão (DTT %), tem-se pelo Módulo 8 do PRODIST a expressão para o cálculo dessa grandeza:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (5.3.3)$$

onde,

$DTT\%$: Distorção harmônica total de tensão;

V_h : Componente harmônica de ordem h [V];

V_1 : Tensão na frequência fundamental [V].

O Módulo 8 do PRODIST ressalta também que, para fins de cálculo da distorção total, deve-se compreender uma faixa de frequência que considere desde a componente fundamental até no mínimo a 25ª ordem harmônica.

Os valores de referência estão indicados na Tabela 5.3, a seguir. O PRODIST deixa claro que os valores servem para referência do planejamento elétrico em termos da QEE e que valores limite serão estabelecidos em resoluções específicas após período de coleta de dados.

Tabela 5.3 – Distorção Harmônica Total de Tensão (PRODIST – Módulo 8).

Tensão nominal do Barramento	(DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Na Figura 5.24 tem-se a distorção harmônica de tensão total máxima, média e mínima para a fase A do período de medição já mencionado.

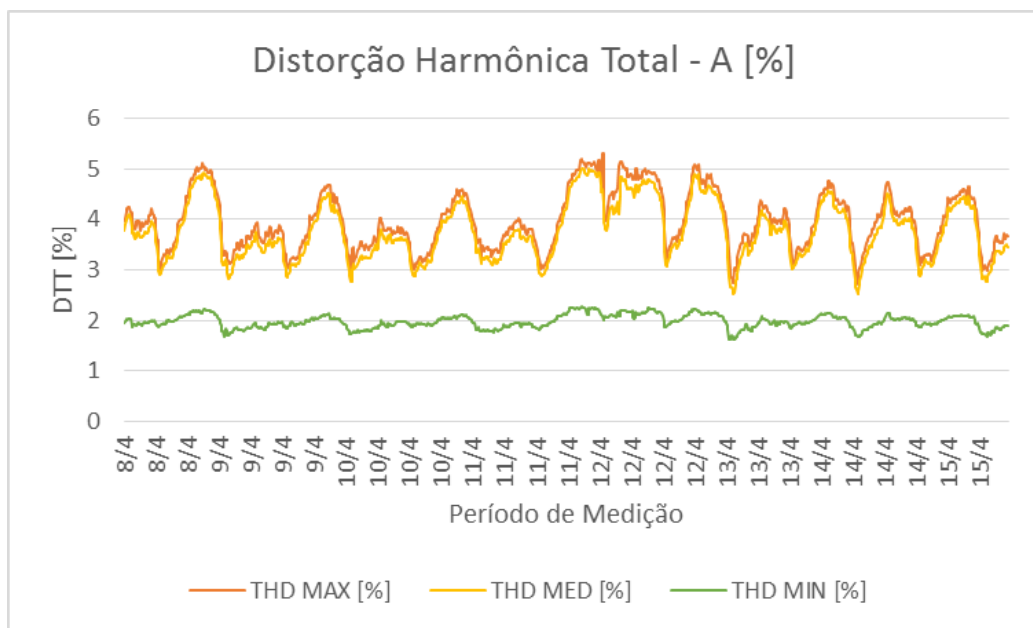


Figura 5.24 – Distorção harmônica total da fase A no período de medição.

Observa-se que, nos momentos onde não há geração, ou seja, no período noturno, a DTT é elevada (em torno de 5%). Na faixa de horário em que existe geração, a DTT fica próxima de 3,5% e este valor está abaixo da referência indicada pelo PRODIST.

Analisa-se que houve uma discrepância entre os valores mínimos medidos durante a semana, pois tal variação ocorreu porque em alguns momentos a medição das tensões de algumas ordens harmônicas foi zero.

Outro ponto em análise é a correlação entre as fases no que diz respeito à distorção harmônica total de tensão. Na Figura 5.25 é possível observar a DTT [%] média de cada fase medida no dia 09/04. Observa-se que no período de geração a distorção total de tensão fica em torno de 3,5% de forma semelhante à faixa semanal.

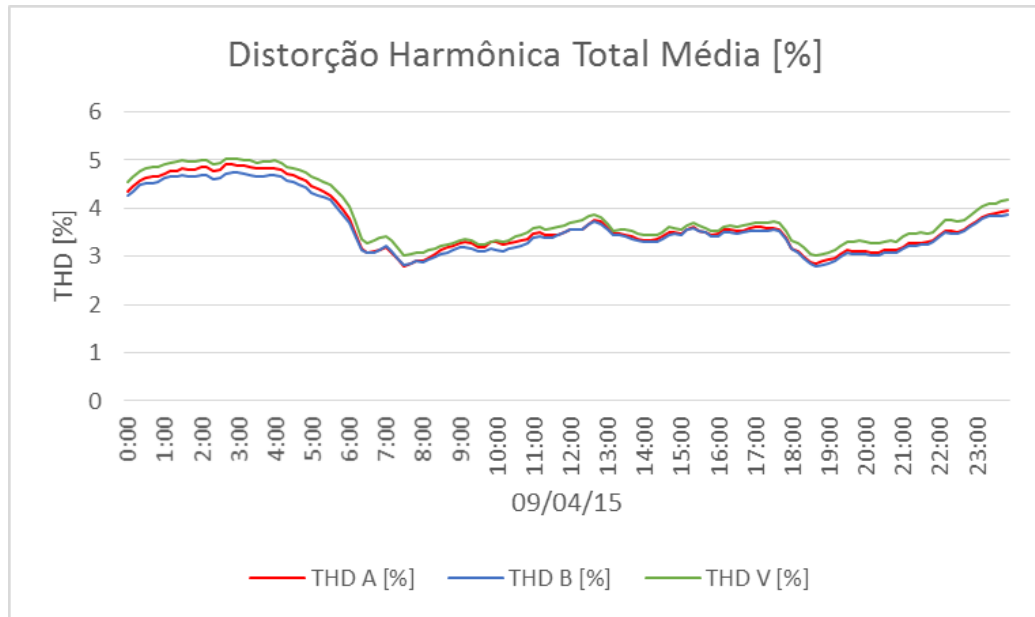


Figura 5.25 – Distorção harmônica total das fases A, B e C do dia 9 de Abril de 2015.

5.3.4.4 Análise da Distorção Harmônica Individual de Tensão

Realizou-se uma análise dos valores de distorções harmônicas individuais de tensão (DIT [%]) com relação à fundamental, através dos indicadores do Módulo 8 do (PRODIST). A equação para análise individual da tensão é:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (5.3.4)$$

onde,

DIT_h %: Distorção harmônica individual de tensão;

V_h : Componente harmônica de ordem h [V];

V_1 : Tensão na frequência fundamental [V].

Da mesma forma que a DTT, devem ser obedecidos os valores de distorções harmônicas individuais indicadas pela Tabela 5.4, a seguir:

Tabela 5.4 – Distorção Harmônica Individual de Tensão segundo o PRODIST (PRODIST – Módulo 8).

Ordem Harmônica	<i>Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]</i>				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	
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

Na Figura 5.26 tem-se o índice de distorção individual da tensão nos seus valores máximos, médios e mínimos para as ordens harmônicas: 3^a, 5^a, 9^a, 11^a e 13^a.

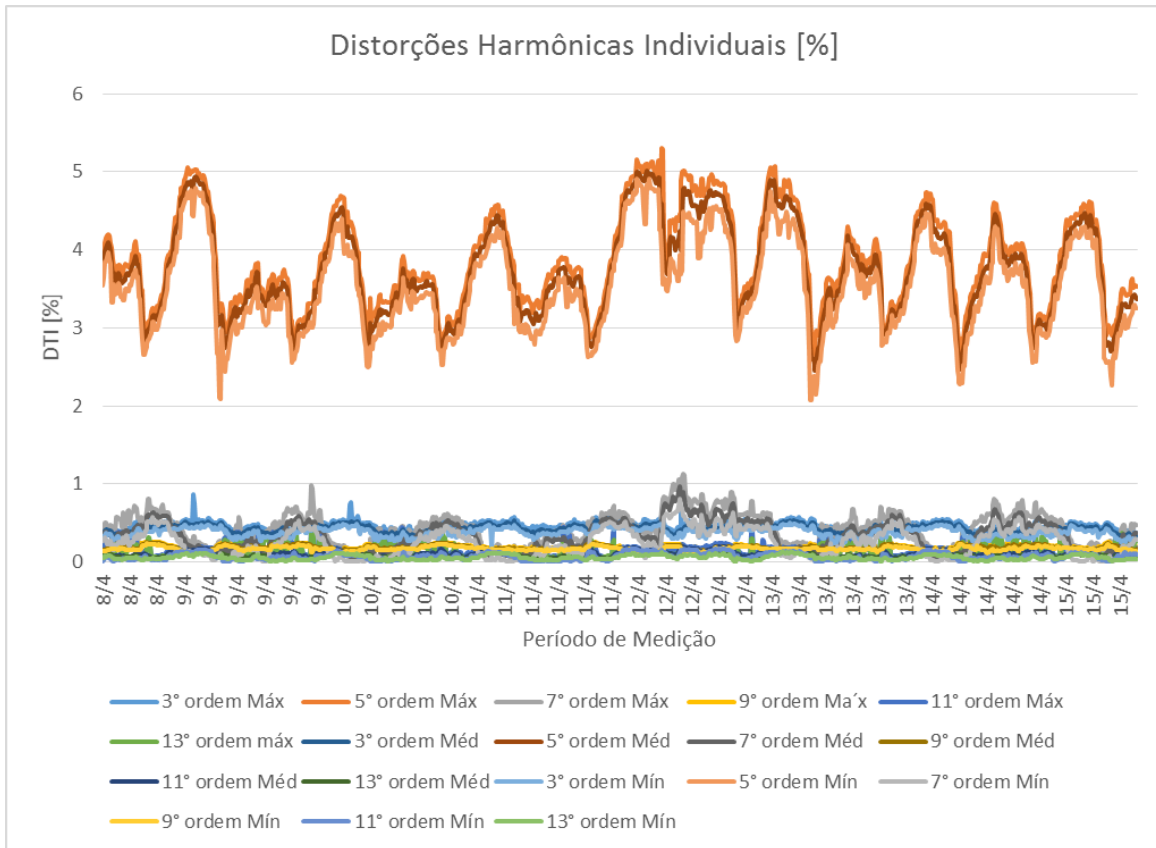


Figura 5.26 - Distorção individual da tensão nos seus valores máximos, médios e mínimos para as ordens harmônicas: 3ª, 5ª, 9ª, 11ª e 13ª na semana de medição.

É perceptível que, no período de geração, o harmônico de 5ª ordem é preponderante com uma distorção individual em torno de 3,5% e que está abaixo dos índices recomendados pelo PRODIST segundo a Tabela 5.4. Nota-se, também, que todas as ordens harmônicas apresentadas ficaram abaixo da referência recomendada. Vale dizer que tal resultado correlaciona-se com o índice de DTT vista anteriormente, evidenciando o seu valor analisado na seção anterior.

Na Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 é possível observar a DTI [%] média de cada fase medida no dia 09/04. Observa-se que, no período de geração, a distorção total de tensão fica em torno de 3,5% de forma semelhante à faixa semanal.

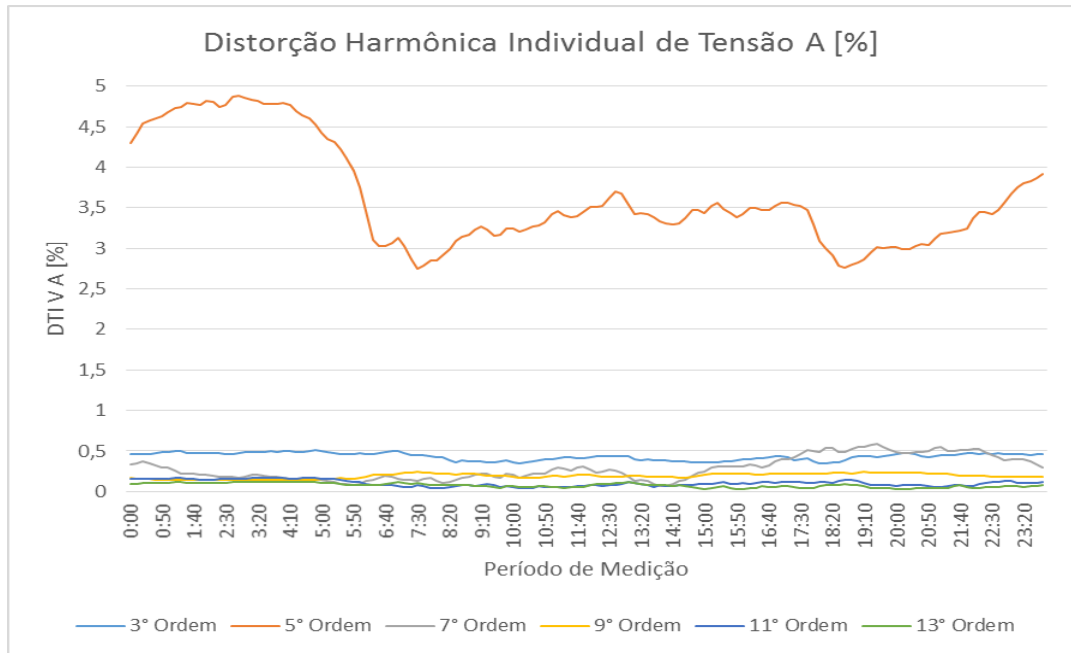


Figura 5.27 – Distorção harmônica individual média da fase A no dia 09 de Abril de 2015.

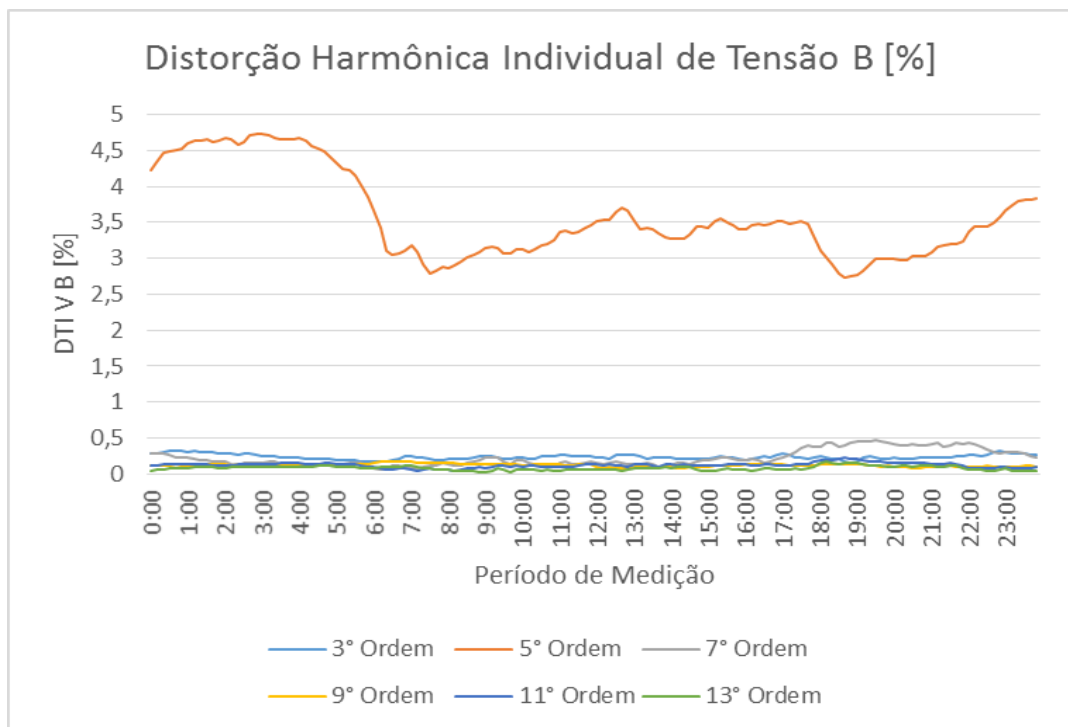


Figura 5.28 – Distorção harmônica individual média da fase B no dia 09 de Abril de 2015.

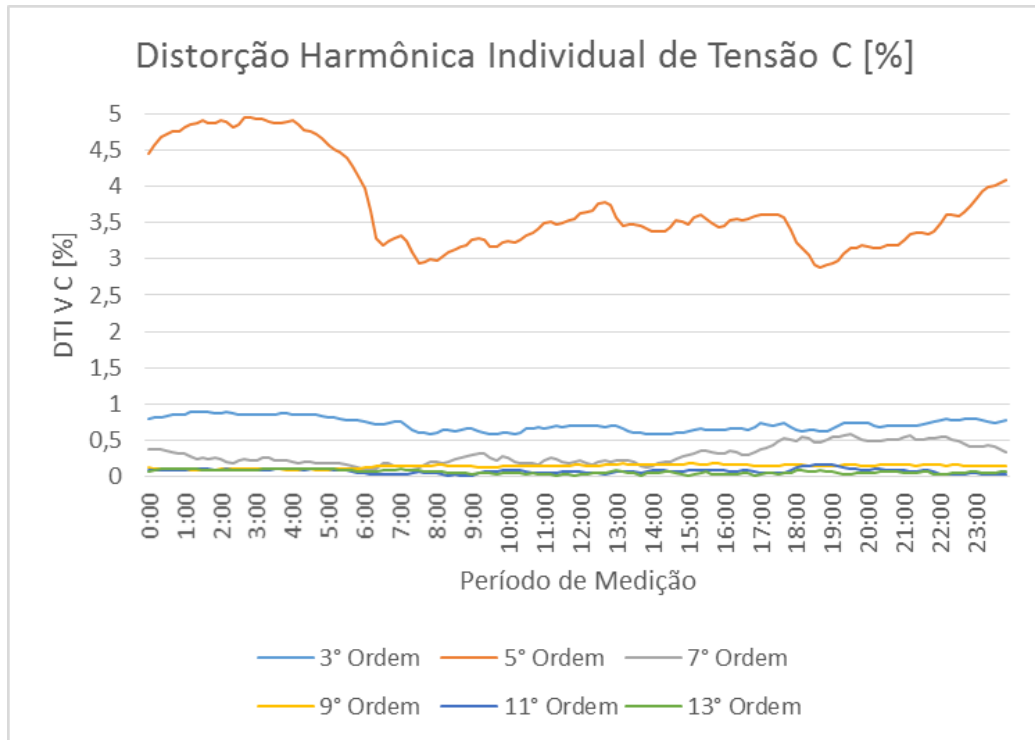


Figura 5.29 – Distorção harmônica individual média da fase C no dia 09 de Abril de 2015.

Finalmente, na Figura 5.30 tem-se o espectro harmônico de tensão das respectivas fases no dia 09/04 no horário das 12h00. Em resumo, nota-se que os valores atendem as referências do PRODIST.

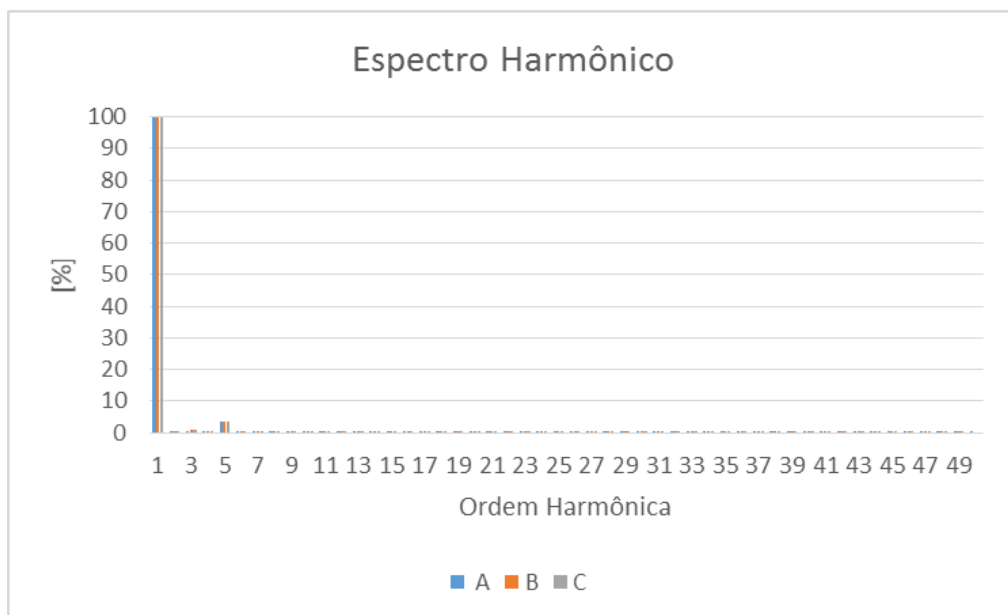


Figura 5.30 – Espectro harmônico de tensão para as Fases A, B e C no dia 09 de Abril de 2015 no horário das 12h00.

5.3.4.5 Análise do Fator de Potência

O PRODIST determina o cálculo do fator de potência através dos valores registrados por medição das potências ativa e reativa (P, Q) ou das energias ativas e reativas (EA, ER) através das seguintes fórmulas:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5.3.5)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (5.3.6)$$

Sendo assim, o PRODIST determina que, para as unidades consumidoras ou conexão entre distribuidoras com tensões inferiores a 230 kV, o fator de potência da instalação no ponto de conexão deve ter um valor mínimo de 0,92 (indutivo ou capacitivo). Caso este valor não seja alcançado, as unidades consumidoras responsáveis são tarifadas devido ao excesso de reativos na rede.

Segundo a CEMIG (2012), com relação às micro e minigerações distribuídas, a potência ativa fornecida pelo gerador à rede terá um valor superior a 20% da potência nominal. O valor do fator de potência pode variar conforme a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Relação do fator de Potência e as Potências Nominais das GDs (CEMIG, 2012).

Potência Nominal da GD [kW]	Fator de potência
≤ 3	$0,98 (ind) \leq f.p \leq 0,98 (cap)$
$3 < P < 6$	$0,95 (ind) \leq f.p \leq 0,95 (cap)$
≥ 6	$0,90 (ind) \leq f.p \leq 0,90 (cap)$

Para o prédio do CERIn, no ponto de conexão do PV e através do cálculo do fator de potência através de (5.3.5), o fator de potência do PV na faixa de horário de produção de energia é apresentado na Figura 5.31.

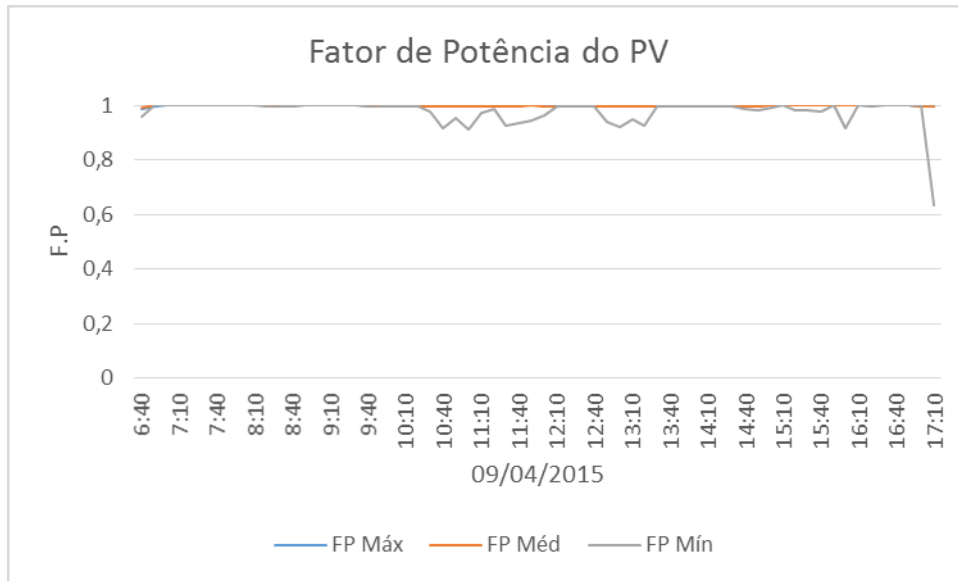


Figura 5.31 – Fator de potência do PV durante o dia 09 de Abril de 2014 na faixa de horário onde há geração de energia.

Sabe-se que os PVs são projetados para que operem com fator de potência unitário que irão suprir de forma parcial ou total a demanda de potência ativa local. Através da análise do PV do CERIn valida-se o que foi dito, pois na maior parte do tempo o PV trabalhou com o fator de potência aproximadamente 1. Os valores medidos abaixo de 1 são devido ao consumo de reativos das cargas que são fornecidas pela rede elétrica. Este consumo de reativos acarreta em uma diminuição do fator de potência.

A Tabela 5.5 trouxe os resultados da faixa de variação do fator de potência com a quantidade de potência gerada pelo PV. Nota-se pela Figura 5.32 que durante o período de geração, o PV ficou na faixa de 0,98 e 0,8 por possuir uma potência nominal maior que 6 kW.

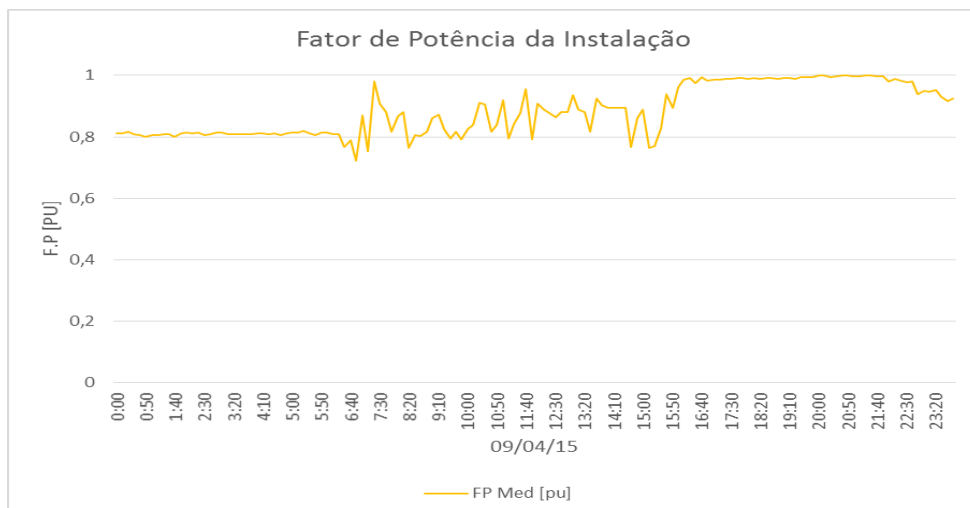


Figura 5.32 – Fator de potência do CERIn durante o dia 09 de Abril de 2014.

Vale ressaltar que a variação do fator de potência de um PV pode provocar alterações nos valores de tensão no ponto de conexão (PALUDO, 2014). Nota-se que, devido ao fato do fator de potência do PV ser unitário, houveram quedas do fator de potência da instalação, trazendo assim, sobretensões nos períodos do dia que serão ilustrados na Secção 5.4.

5.3.4.6 Análise da Potência Reativa

Pela Figura 5.33, tem-se o perfil de demanda reativa pelo prédio do CERIn no dia 09/04/2015. Nota-se que durante a madrugada, o perfil de reativo se mantém constante, pois quase carga alguma está sendo alimentada, estando energizado apenas o transformador do prédio. Quando começa amanhecer e a produção de energia pelo PV é iniciada e cargas como computadores e iluminação são ligados, e a demanda de reativos da rede aumenta, pois vale ressaltar que o fator de potência do PV é unitário cobrindo apenas a demanda de ativo do local. Logo, toda energia reativa consumida é fornecida pela concessionária.

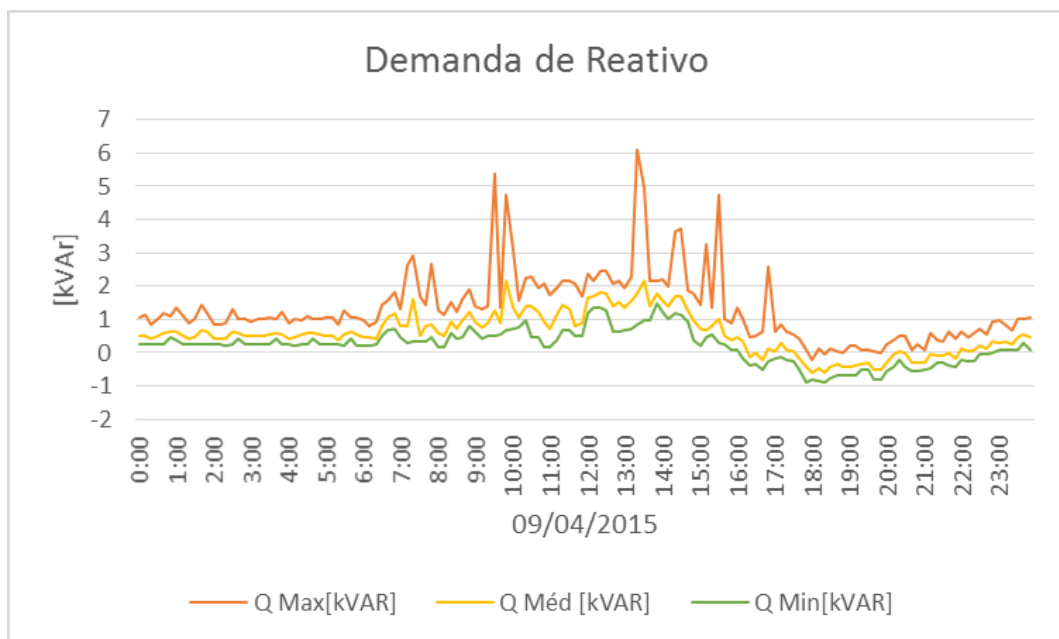


Figura 5.33 – Demanda de potência reativa pelo CERIn no dia 09 de Abril de 2015.

A Figura 5.34 traça o perfil de consumo de reativos pelo PV.

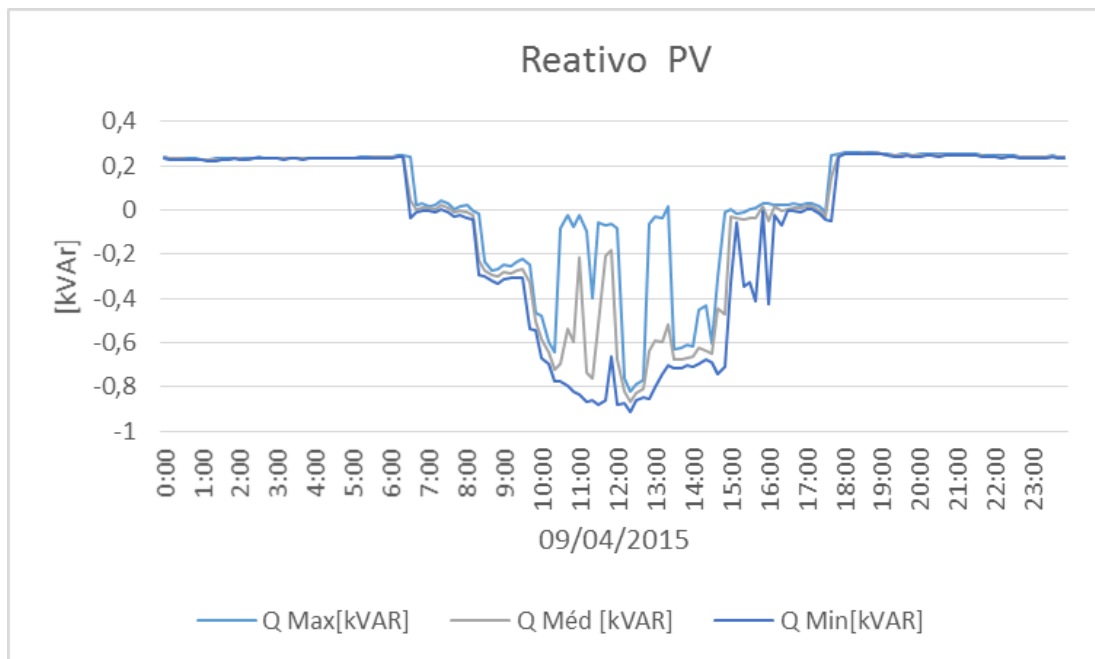


Figura 5.34 – Consumo de reativos pelo PV durante o dia 09 de Abril de 2015.

Por fim, a Figura 5.35 tem-se o perfil de reativos durante a semana de medição.

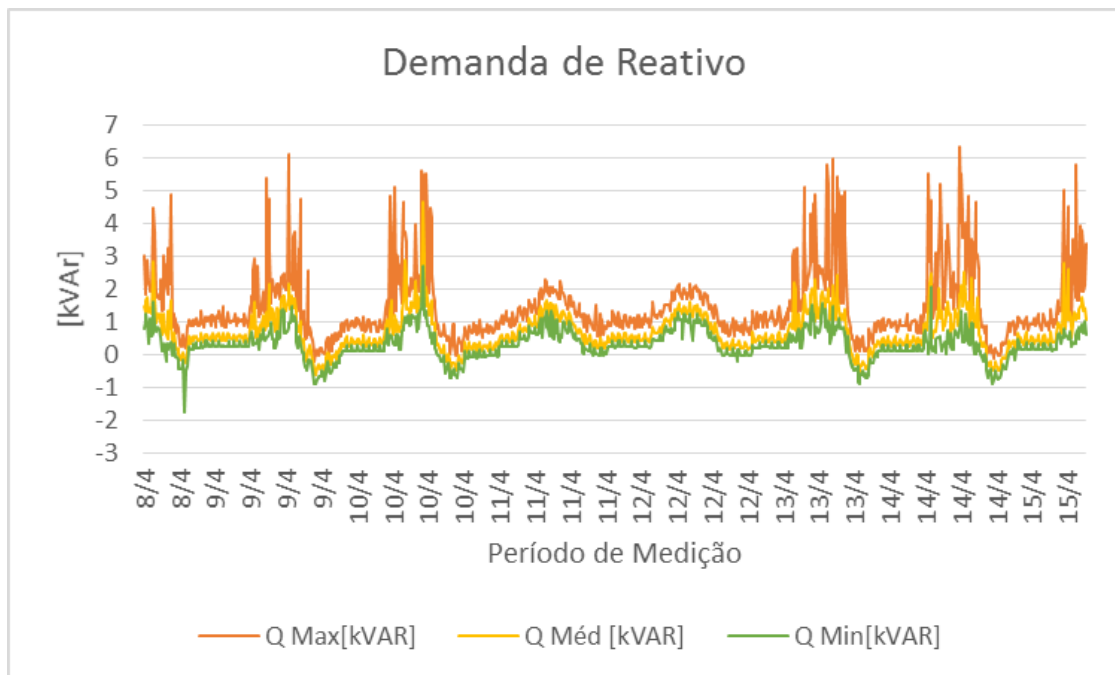


Figura 5.35 – Potência reativa demandada pelo CERIn durante a semana de medição.

5.3.4.7 Análise da Frequência

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, as instalações de geração conectadas à barra, em condições normais de operação e regime permanente, devem operar na faixa de frequências entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Ao sair da faixa compreendida entre os valores 59,5 Hz e 60,5 Hz, os sistemas devem garantir que em um prazo de 30 segundos, estes devam voltar à faixa normal de operação, garantindo a recuperação do equilíbrio carga-geração. O PRODIST deixa claro que em condições extremas a frequência não deve exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz. Também, quando houver sobrefrequência o sistema pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz no máximo 10 segundos, e de maneira análoga, quando houver subfrequência o sistema pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

No que se refere à variação de frequência do sistema do CERIn, a Figura 5.36 ilustra essa variação correspondente ao período de medição já mencionado anteriormente. Pode-se observar que na maior parte do tempo a frequência se encontra dentro dos limites indicados pela referência e houveram poucos momentos em que foram excedidos os valores de referência superior e inferior. As causas com certeza se deram através de fenômenos desconhecidos no campus da UNIFEI.

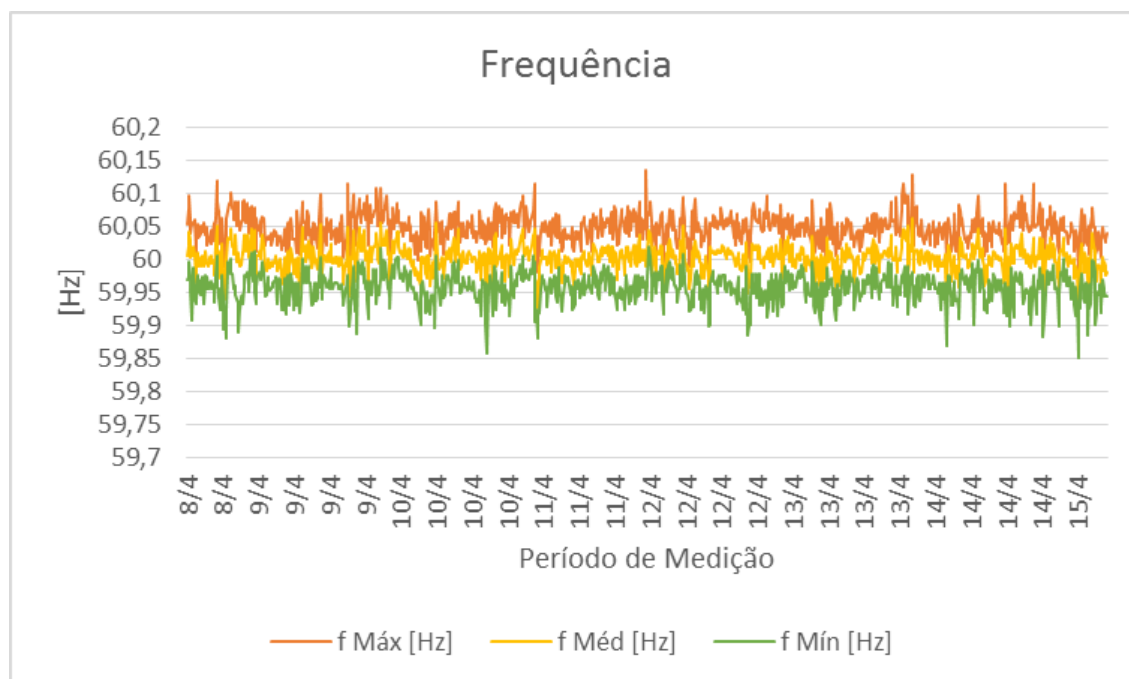


Figura 5.36 – Frequência do CERIn durante a semana de medição.

A título de ilustração, a Figura 5.37 ilustra o perfil da frequência no dia 09/04. Nota-se que a frequência se encontra dentro dos limites indicados.

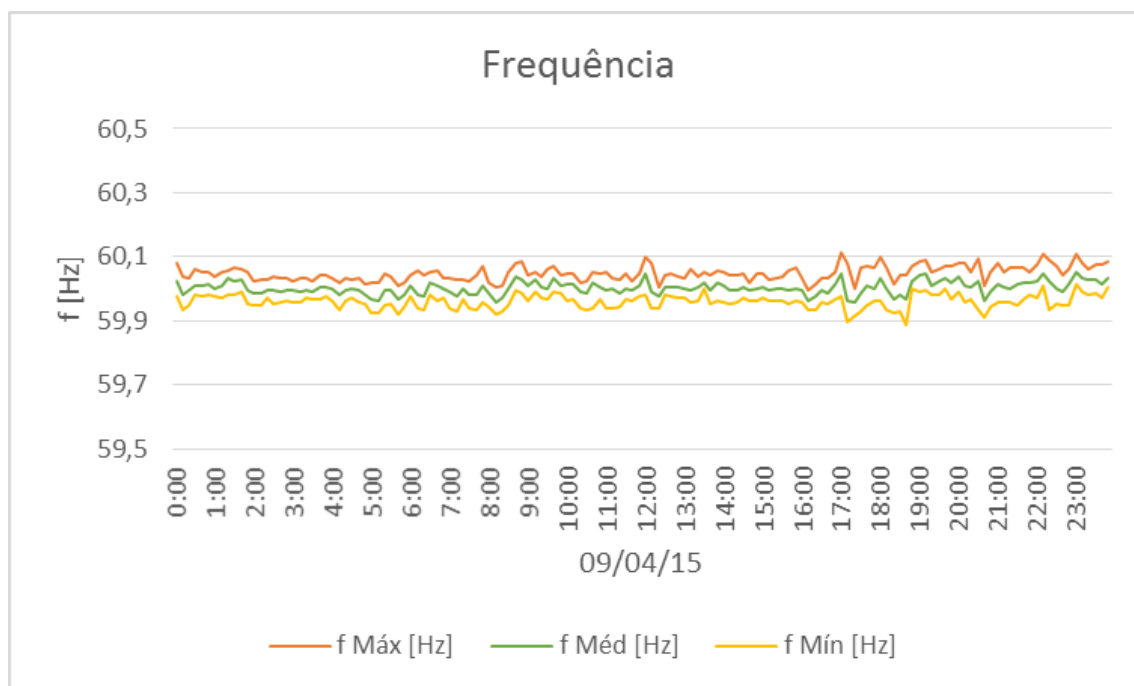


Figura 5.37 – Frequência do CERIn durante o dia 09 de Abril de 2015.

5.4 Estimativa da capacidade de Hospedagem de Sobretensões Permitidas Através de Medição

A Figura 5.38 mostra a topologia do diagrama unifilar simplificado da instalação do PV no edifício do CERIn. Com as medições feitas é estimado o conceito da capacidade de hospedagem em comparação à potência atual instalada de PVs e potência futura dentro dos limites impostos pela área útil disponível no telhado do edifício.

As medições foram feitas segundo referências citadas anteriormente, possibilitando o cálculo dos indicadores de transgressão de tensão (PRODIST – Módulo 8, 2015).

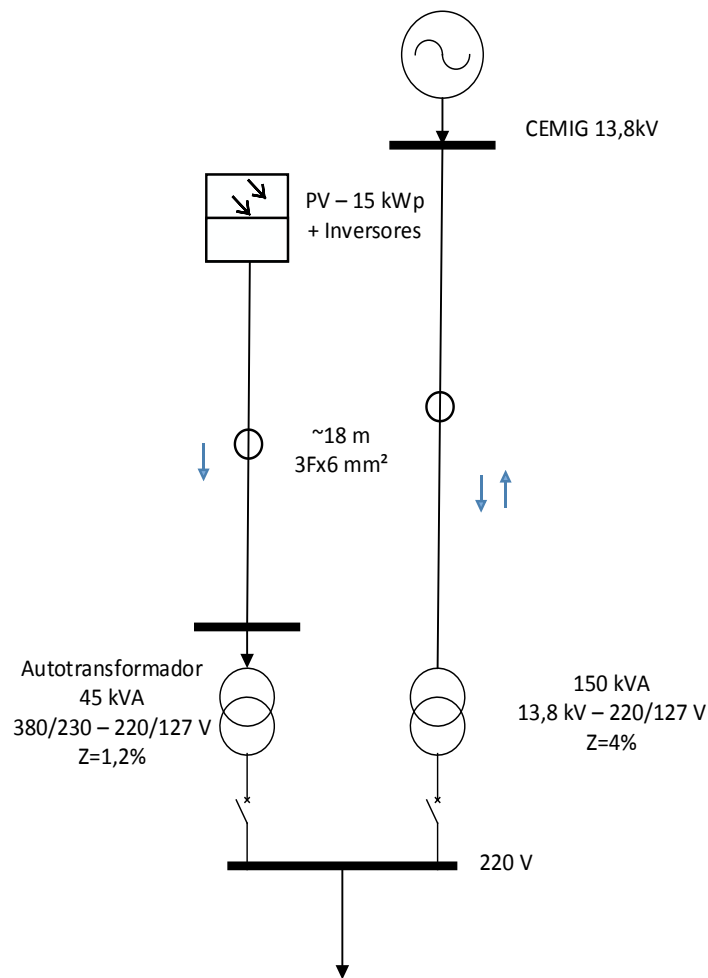


Figura 5.38 - Topologia do diagrama Unifilar do CERIn.

Ressalta-se que através do Módulo 8 do PRODIST é recomendada uma tensão nominal de operação para a redes com tensão inferior a 1 kV que fique entre 95% e 105% da tensão nominal do terminal de derivação.

5.4.1 Apresentação dos Resultados de Medição

Os resultados para medições de tensão são mostrados nas Figuras 5.39, 5.40 e 5.41, que ilustram o comportamento das tensões entre fase-neutro de cada uma das fases para os seus valores RMS máximos, médios e mínimos no período citado. Vale ressaltar que a tensão RMS nominal da rede é de 220 V entre fases e 127 V entre fase e neutro. Posteriormente, são mostradas as variações de tensão entre fases no local de medição e no período citado.

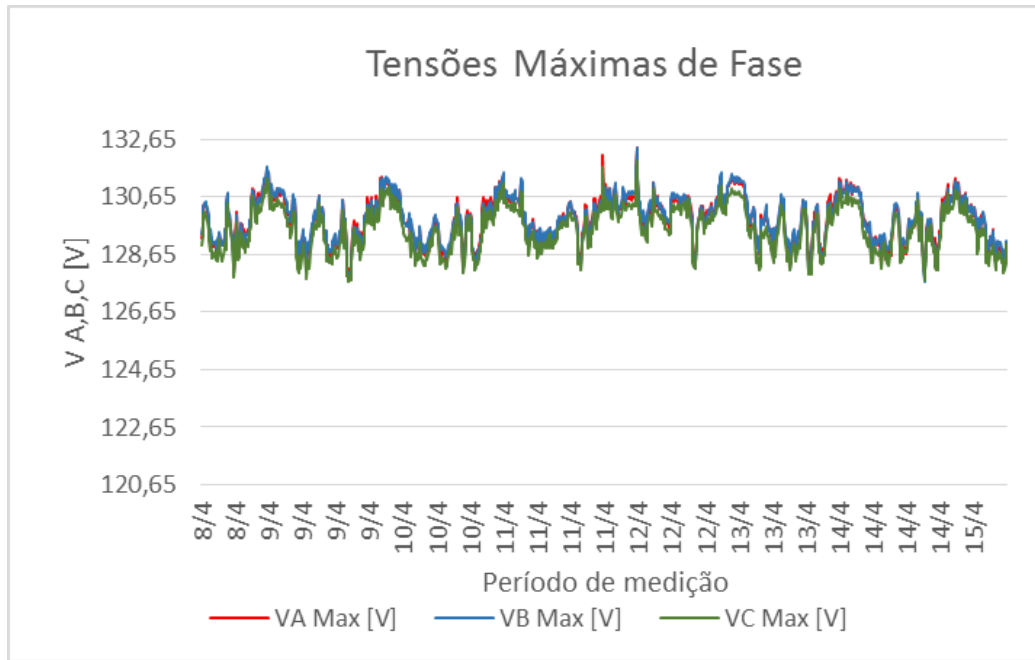


Figura 5.39 – Tensões máximas das fases A, B e C na semana de medição.

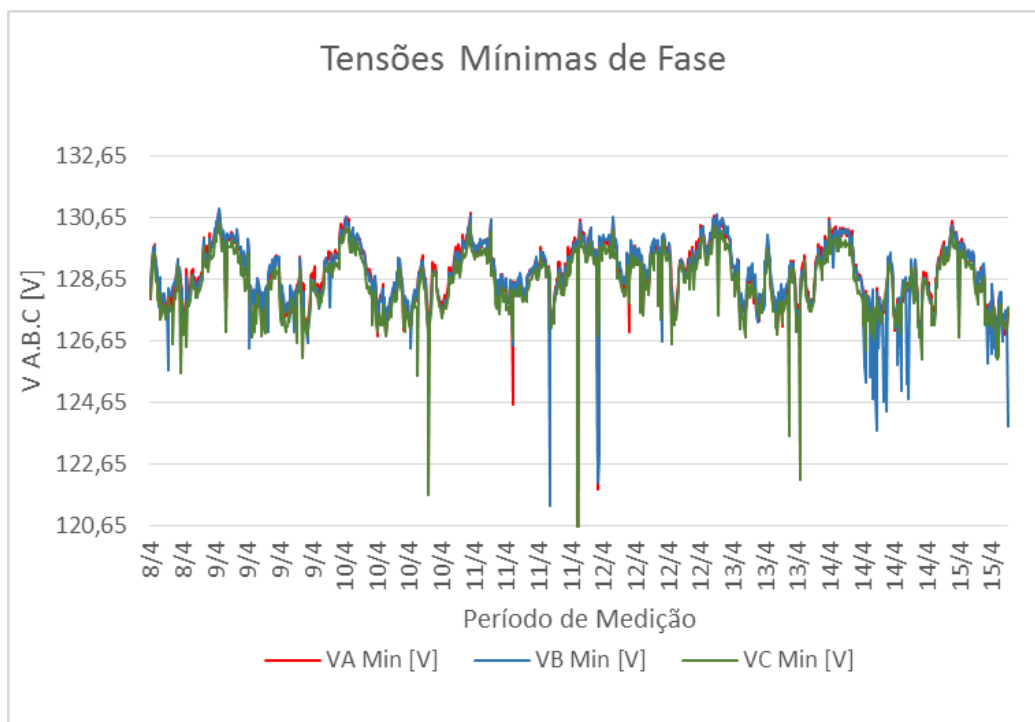


Figura 5.40 – Tensões mínimas das fases A, B e C na semana de medição.

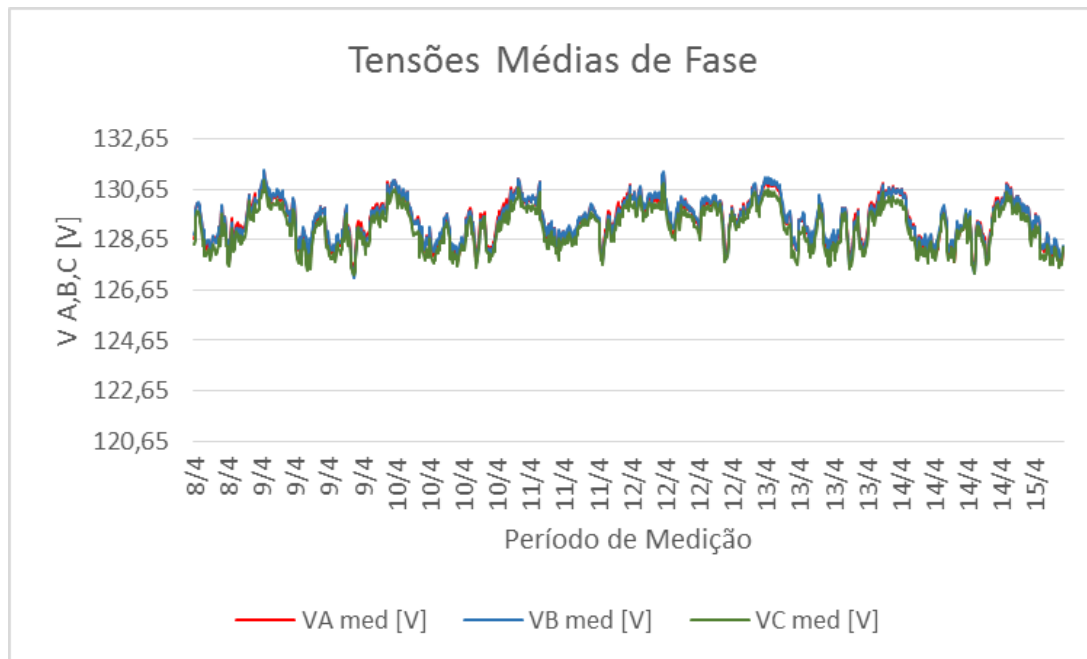


Figura 5.41 – Tensões médias das fases A, B e C na semana de medição.

Na Figura 5.40 os picos de baixa tensão correspondem a afundamentos temporários de tensão. Segundo o PRODIST, afundamentos temporários de tensão são os eventos que duram uma faixa de 3 segundos a 3 minutos e com amplitude variando entre 0,1 p.u e 0,9 p.u. Estes fenômenos foram possivelmente causados na rede elétrica do campus da UNIFEI.

A Figura 5.42 mostra o gráfico correlacionando as máximas, médias e mínimas para a fase A usada como referência.

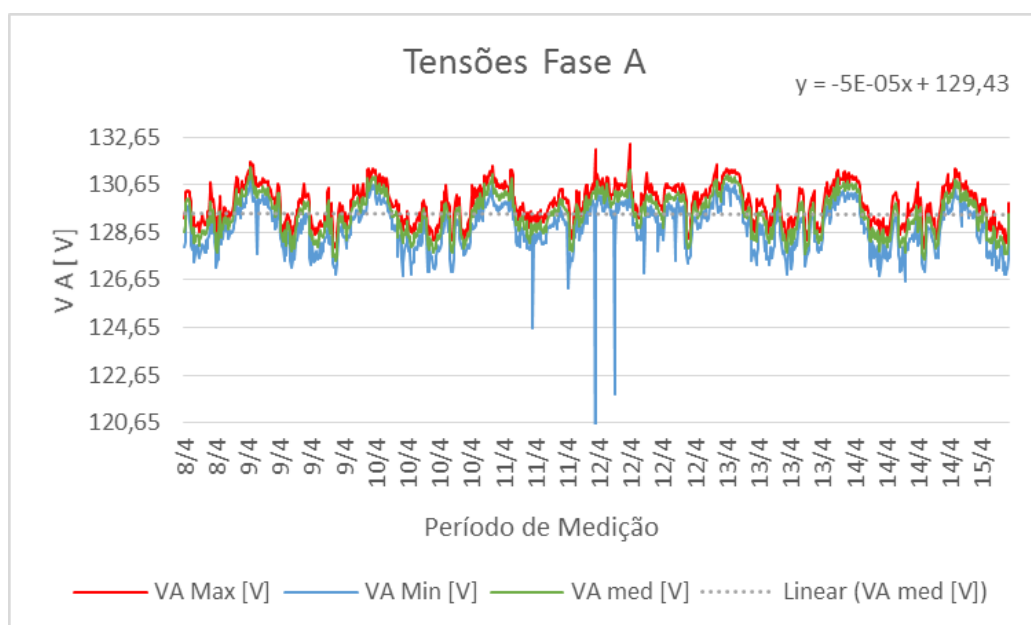


Figura 5.42–Valores máximos, médios e mínimos da tensão fase-neuro na fase A durante a semana de medição.

Apresentam-se as tabelas com a contribuição das tensões máximas, médias e mínimas para cada fase. Para cada contribuição são apresentados os valores médios das medições de mínimo, médio e máximo no período de medição. A Tabela 5.6 mostra a apresentação de resultados para o cenário.

Tabela 5.6–Valores Médios das Tensões de fase para as Medições Máximas, Médias e Mínimas.

	Medição de Tensão [V]		
	Mínima	Média	Máxima
FASE A	128,8250	129,4081	129,8693
FASE B	128,8630	129,4290	129,8920
FASE C	128,5040	129,0972	129,5458

De maneira semelhante, analisou-se o comportamento das tensões RMS entre fases da tensão de linha AB. A Figura 5.43 mostra o perfil de tensão máximo, médio e mínimo referente à medição.

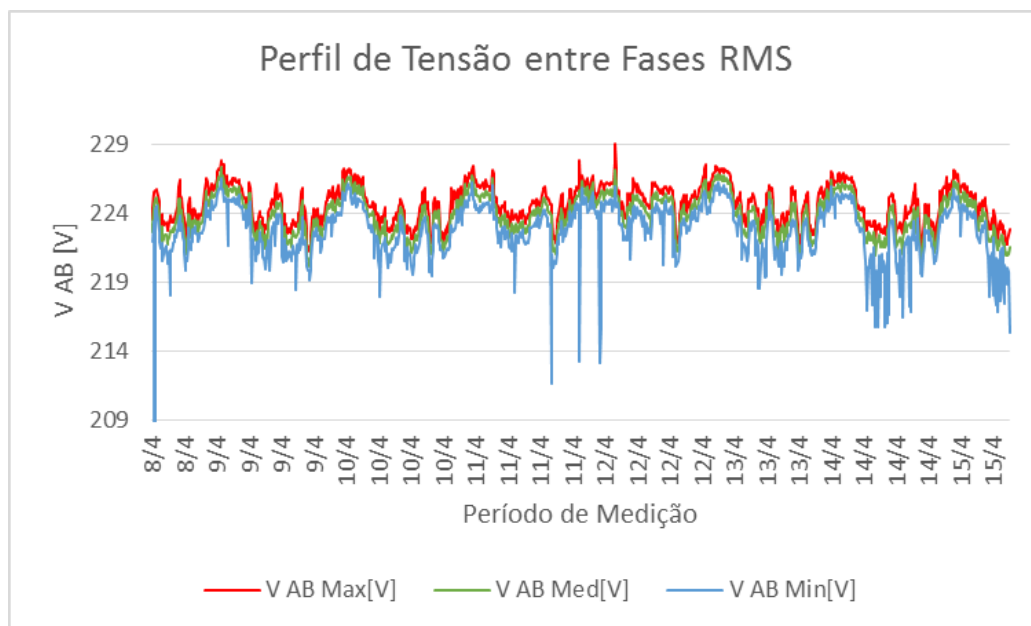


Figura 5.43–Perfil de Tensão entre fases máximas, médias e mínimas no período de medição.

A Tabela 5.7 mostra a apresentação de resultados para o perfil de tensão citado anteriormente.

Tabela 5.7–Medição das Tensões entre Fases.

	Medição de Tensão [V]		
	Mínima	Média	Máxima
VAB	222,7841	223,9466	224,7541

O mesmo gráfico pode ser demonstrado com seus valores em p.u. nas bases de 220 V para facilidade na determinação da margem de sobretensão relativa. Portanto, a Figura 5.44 mostra o perfil de tensão em pu.

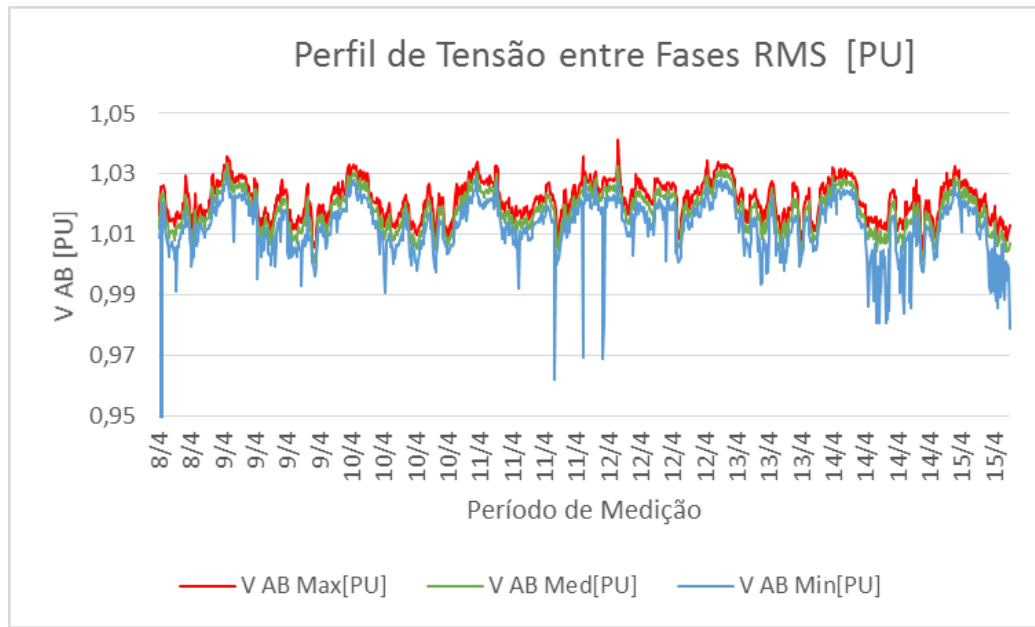


Figura 5.44 - Perfil de Tensão entre fases máximas, médias e mínimas em p.u. na base de 220 V no período de medição.

A Tabela 5.8 mostra a apresentação de resultados para o perfil de tensão entre fases em P.U. citado anteriormente.

Tabela 5.8 - Medição das Tensões entre Fases em p.u.

Medição de Tensão [PU]			
	Mínima	Média	Máxima
VAB	1,0126	1,0179	1,0216

Através destes resultados, calcula-se a margem de sobretensão relativa para a barra de 220 V do CERIn, a qual é dada pela seguinte equação:

$$\delta V_{rel}(\%) = \frac{(V_{medido} - V_{barra})}{V_{barra}} \times 100 \% \quad (5.4.1)$$

A Tabela 5.9 mostra os resultados encontrados:

Tabela 5.9–Margem de Sobretensões Máximas, Médias e Mínimas.

	Margem de Sobretensão [%]		
	Mínima	Média	Máxima
δV	1,26	1,79	2,16

Portanto, estes valores serão usados como referência na determinação da capacidade de hospedagem com relação às sobretensões permitidas.

Através da Tabela 5.9 o valor médio da margem de sobretensão máxima é de 2,16%. Para cenários de carga leve e máxima geração, a margem de sobretensão máxima pode chegar em torno de 4% conforme análise da Figura 5.44. Considerando os dados da Tabela 5.9, as equações (4.2.1) e (4.2.2) da seção 4.2 e o comprimento do alimentador mostrado na Figura 5.37, para 1% de margem de sobretensão a potência máxima do Sistema Fotovoltaico é de 9,6 kW_p . Para que o nível de tensão atinja o valor de sobretensão médio medido, a capacidade de hospedagem seria de aproximadamente 21,703 kW_p , considerando a produção de pico da potência instalada de 15 kW_p .

Segundo o levantamento feito, a geração solar estimada considerando toda a área útil do telhado do prédio seria de 60 kW_p o que traria uma sobretensão de 6,3%. Seguindo as recomendação do PRODIST – Módulo 8, uma margem de 5% de sobretensão limitaria a capacidade de hospedagem em um total de 48 kW_p . A Figura 5.45 apresenta o perfil da capacidade de hospedagem com relação à sobretensão permitida, também expressa nos dados apresentados na Tabela 5.10, segundo o conceito ilustrado na Figura 4.1.

Tabela 5.10–Valores Calculados para a Capacidade de Hospedagem com Relação a Sobretensões Permitidas.

Capacidade de Hospedagem	
P máx [kW]	δV Máx
9,603	1,00%
11,783	1,27%
15	1,56%
17,218	1,79%
16,321	1,83%
19,231	2%
20,742	2,16%
28,809	3%
30	3,12%
38,412	4%
48,015	5%
60	6,24%

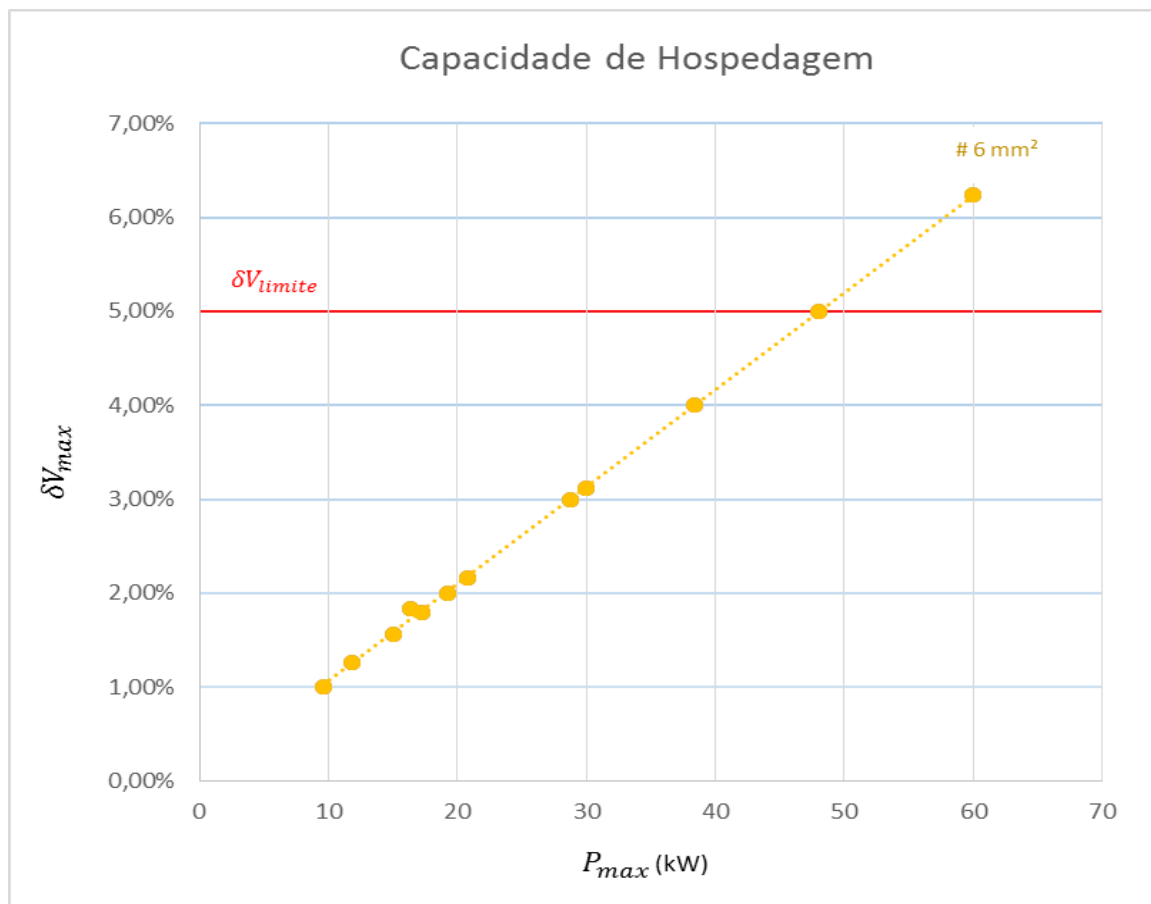


Figura 5.45–Perfil da Capacidade de Hospedagem de sobretensões permitidas para o CERIn.

Analisando a Tabela 5.10 e a Figura 5.45, tem-se as seguintes conclusões:

- Existência da linearidade entre a margem de sobretensão e máxima potência a ser instalada no local;
- A definição de limites inferiores e superiores através de normas regulamentadoras, no caso estudado, o PRODIST;
- Haverá uma expansão do sistema do CERIn para 30 kWp e segundo análise, esse valor de geração pode trazer uma sobretensão de até 1,0312, o qual ainda se encontra dentro dos valores de referência;
- Através de um método relativamente simples, pode-se avaliar o impacto de sobretensões com precisão e através de medições locais.

A seguir, tem-se a análise da capacidade de hospedagem vista a partir de distorções harmônicas causadas devido à eletrônica de potência dos inversores na geração fotovoltaica.

5.5 Estimativa da capacidade de Hospedagem através de Distorções Harmônicas

A fim da realização da metodologia proposta na seção 4.2, no que diz respeito sobre a capacidade de hospedagem para distorções harmônicas, este cálculo foi simulado dentro do cenário que existe no CERIn, um cenário futuro do prédio e também para um cenário de expansão das fontes renováveis que acontecerão no campus da UNIFEI.

5.5.1 Considerações Iniciais para a Simulação

Para este tipo de simulação, uma determinada quantidade de dados deve ser considerada e espera-se que esteja disponível.

Devido a variações que podem ser encontradas no sistema elétrico, como por exemplo, as alterações nas distorções de fundo e modificação da impedância harmônica da rede, este tipo de comportamento acaba sendo muito comum nos sistemas elétricos devido à variação de diversos fatores, tais como: Variações de carregamento, inclusão de banco de capacitores ou até mesmo capacitância de cabos, comutação de transformadores, alteração das injeções harmônicas da rede devido a cargas não lineares e outras gerações distribuídas, etc.

Segundo Santos et al (2015) para o cálculo da emissão em função da capacidade já instalada na rede, é necessário saber:

- Valores existentes das distorções harmônicas já encontradas (tais como: ângulo de fase e magnitude) e a expectativa das variações diárias, semanais e sazonais para cenários futuros que sejam próximos;
- A emissão harmônica de novos dispositivos, prevendo a sua inserção naquele sistema. No caso do campus da UNIFEI, novas gerações distribuídas a serem instaladas (solar e eólica) e através destes dispositivos a injeção de corrente harmônica com suas variações diárias, semanais e sazonais e a relação entre elas com as distorções harmônicas causadas;
- Impedância harmônica da fonte e também qualquer variação que a impedância da fonte venha a sofrer futuramente.

Assim, adquirindo tais informações é possível calcular e determinar a capacidade de hospedagem das barras individuais ou sistêmicas através do procedimento proposto no Capítulo 4 mesmo que haja divergências entre seus parâmetros. Sugeriu-se para avaliação o uso dos limites propostos pelo PRODIST em conjunto com a norma IEEE 519 do *Institute of Electrical and Electronics Engineers (2014)*. Tanto o PRODIST quanto a IEEE 519 são ferramentas para o planejamento e, portanto, para auxílio no cálculo do nível de penetração harmônica permitida.

5.5.2 Estudo de Caso: O CERIn e a Rede Elétrica da UNIFEI

Nesta seção será apresentado um estudo de caso através dos dados disponíveis das características elétricas do CERIn e da UNIFEI para uma dada condição de operação em particular. O sistema elétrico da UNIFEI já foi descrito na seção 5.3.1. O uso do software PTW já foi descrito anteriormente, e, portanto, todas as apresentações de dados relativos ao sistema, tal como o diagrama unifilar, serão feitas através do *software*.

Para simulação no PTW considerou-se os seguintes aspectos:

- Apenas a saída que alimenta o prédio do CERIn e cargas que estão conectadas a este alimentador foi analisada para o cenário futuro;
- O restante do campus foi modelado como uma carga equivalente;
- Devido à imprecisão e falta de dados representativos das cargas da UNIFEI, considerou-se variações aleatórias de carga;
- Para o PV do CERIn, atribuiu-se ao PTW a geração de 11,76 kWp com fator de potência unitária;

- Para o cenário de reprodução de PVs ao longo do alimentador, considerou-se a reprodução dessa mesma geração nos outros prédios;
- A título de validação, dentro do prédio do CERIn para o cenário atual, comparou-se resultados de simulação e de medição para validação antes da expansão de outras cargas.

5.5.2.1 Parâmetros Elétricos do Sistema

O diagrama unifilar do sistema elétrico da UNIFEI para o alimentador onde o CERIn está conectado (neste caso, alimentador 4) e sua condição equivalente é mostrado na Figura 5.46 (identificado nesta figura como alimentador L1). Os parâmetros do sistema de distribuição são apresentados nas Tabelas 5.11-5.14.

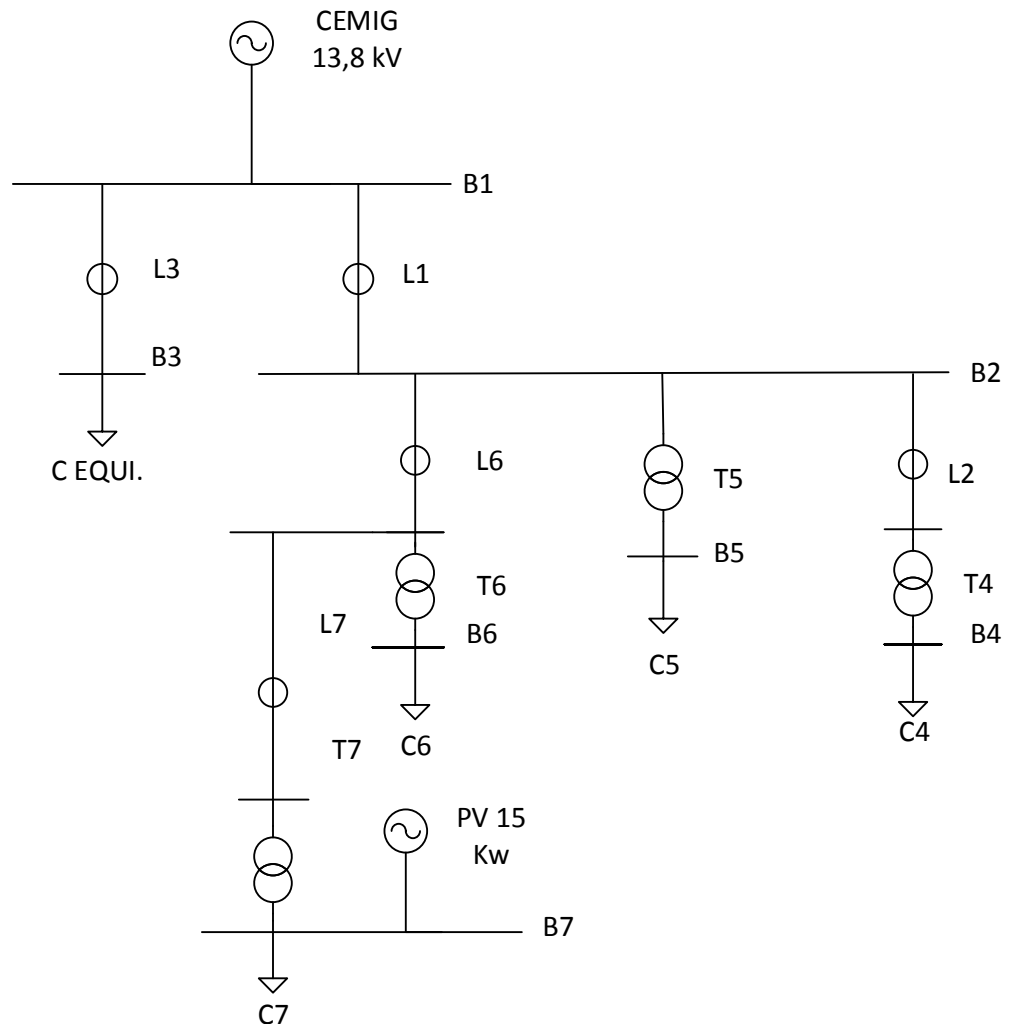


Figura 5.46–Diagrama Unifilar Equivalente da UNIFEI com expansão do alimentador 4.

O PV instalado no CERIn é mostrado no cenário atual. Para o cenário 1, a análise da capacidade de hospedagem será validada para a barra 7 (B7) de 220 V. As ordens harmônicas consideradas serão: 2^a, 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a conforme sugestão em (SANTOS et al. 2015).

Tabela 5.11–Valores de Cargas Equivalentes

Cargas	Nome	kVA	f.p. ind.
C EQUI.	EQUIVALENTE	300	0,98
C4	EXCEN	3,04	0,95
C5	BIOMATERIAIS	2,02	0,97
C6	INCIT	3,08	0,95
C7	CERIn	0,7	0,93

Tabela 5.12 – Valores de Cabos.

Cabos	L [m]	R1 [Ω /km]	X1 [Ω /km]	C1 [Mho/km]
L1	400	1,0531	0,1624	0,00009
L2	85	1,0531	0,1624	0,00009
L3	400	1,0531	0,1624	0,00009
L6	80	1,0531	0,1624	0,00009
L7	45	1,0531	0,1624	0,00009

Tabela 5.13 – Valores dos Transformadores.

Transformador	Sn [kVA]	Tap [kV]	Z%	X/R
T4	150	13,8/0,22	4,00	3,585
T5	150	13,8/0,22	4,00	3,585
T6	300	13,8/0,22	4,00	3,585
T7	150	13,8/0,22	4,16	3,585

Tabela 5.14 – Equivalentes de Geração.

Dados de Geração	[kV]	Sc _c 3F [MVA]	(°)	P [kW _p]	f.p
CEMIG	13,8	179,95	-88°	-	-
PV	0,22	-	-	15,00	1,00

Para aplicação da metodologia proposta no capítulo 4 torna-se necessário saber os limites individuais dos harmônicos, que foram apresentados na seção 5.1. Como sugestão foram escolhidas algumas ordens harmônicas. A Tabela 5.15 faz um resumo das ordens harmônicas utilizadas no caso teste, para os níveis de tensão em 220 V e 13,8 kV.

Tabela 5.15–Valores Limite de Distorção Harmônica Individual [%].

h	DIT h [%]	
	220 V	13,8 kV
2	2,5	2
3	6,5	5
5	7,5	6
7	6,5	5
9	2	1,5
11	4,5	3,5
13	4	3

Dentro do PTW é possível caracterizar o modelamento exato destas cargas que podem ser encontradas na biblioteca do *software*. Utilizou-se um modelo de cargas harmônicas de prédios comerciais para uma aproximação da realidade dos prédios encontrados no campus, onde basicamente tem-se computadores e lâmpadas fluorescentes. Já a fonte harmônica do PV foi modelada através dos resultados de injeção de corrente harmônica medida e que estão apresentadas no ANEXO A.

5.5.2.2 Cenário 1 – Aplicação da metodologia para os Resultados de Medição e Simulação para Validação

O cenário 1, dividiu-se em duas etapas:

1. Aplicação da metodologia usando os resultados de medição da tensão harmônica na barra do CERIn (B7) e os valores de impedância harmônica calculada através do PTW;
2. Aplicação da metodologia usando os resultados de simulação da tensão harmônica na barra do CERIn (B7) e os valores de impedância harmônica calculada através do PTW.

Para a etapa 1, a Tabela 5.16 estimou a impedância harmônica em valores por unidade (Bases: 220V e 150 kVA) vista pela B7, os valores de tensão através dos resultados de medição e a corrente harmônica injetada calculada através da equação (4.2.5).

Tabela 5.16–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 15 kWp
(Medição).

h	Z (p.u)	Vh [V]	V u-h	I u-h
2	0,07942	0,06019	0,00027	0,00344
3	0,11576	0,94411	0,00429	0,03707
5	0,19689	7,64562	0,03475	0,17651
7	0,27551	0,62238	0,00283	0,01027
9	0,34622	0,41438	0,00188	0,00544
11	0,43311	0,1122	0,00051	0,00118
13	0,51207	0,10401	0,00047	0,00092

Através das equações (4.2.9) e (4.2.10) o método é aplicado agregando ambos os extremos dos valores para ambos os limites de corrente (melhor e pior cenário) para as 7 ordens harmônicas mencionadas.

Tabela 5.17–Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp
(Medição).

h	I u-h	V limite/Z u-h	IHC pior [A]	IHC melhor [A]	P pior[kW]	P melhor[kW]
2	0,003444964	0,314798026	122,563482	125,2756882	667,185131	681,9492644
3	0,037071571	0,561508263	206,4434082	235,6297011	1123,79291	1282,671073
5	0,176505545	0,380916393	80,46590346	219,4279815	438,023247	1194,475582
7	0,010268319	0,235928969	88,83084372	96,9150481	483,558537	527,5656173
9	0,005440324	0,057767422	20,59845297	24,881597	112,129497	135,4451691
11	0,001177548	0,103900854	40,43681448	41,36389346	220,121368	225,1680045
13	0,000923224	0,078114275	30,38609593	31,11294603	330,81879	338,732135

Os resultados de avaliação de capacidade de hospedagem harmônicas são apresentadas na Tabela 5.17 para ambas as situações. Nesta tabela, a capacidade de hospedagem harmônica é apresentada em termos da corrente harmônica.

Observando a corrente harmônica de 9ª ordem, nota-se que a máxima corrente que pode ser injetada na barra 7 para a pior situação é na ordem de 20,6 A e para a melhor situação, 24 A. Isso significa que estas correntes são capazes de conduzir a tensão harmônica de 9ª ordem para a tensão limite, ou seja, de 2% de distorção harmônica de tensão limitada pelo PRODIST.

Através da IEEE 519 para PAC em níveis de tensão entre 120 V e 69 kV o usuário pode limitar as correntes harmônicas que o seguem. A Tabela 5.18 apresenta esses limites.

Tabela 5.18—Distorção Harmônica Individual de Corrente (IEEE 519, 2014).

I_{CC}/I_L	DII h [%]	
	<11	$11 \leq h < 23$
<20	4,0	2
20<50	7,0	3,5
50<100	10,0	4,5
100<1000	12,0	5,5
>1000	15,0	7,0

Na Tabela 5.18,

I_{CC}/I_L é a razão entre a máxima corrente de curto circuito no PAC e a máxima corrente de demanda na componente fundamental.

Na barra 7, através de uma simulação de curto-circuito pelo PTW encontrou-se que a máxima corrente de curto-circuito na barra é 10 kA e a corrente máxima de demanda na componente fundamental será a corrente nominal no lado de BT do transformador, ou seja, 393 A. Deste modo, a razão entre as correntes é igual a 23. Através da Tabela 5.18, tem-se que a distorção harmônica de corrente para a razão entre as correntes calculadas no PAC e para ordens harmônicas menores que a 9ª é igual a 7%. Logo, este valor será usado para o cálculo da capacidade de hospedagem em termos de potência injetada.

Para o pior cenário, a corrente de 9ª harmônica cujo valor é 20,6 A equivale a 7% da corrente total, ou seja, 295 A. Sendo assim, a capacidade de hospedagem para esta barra no pior cenário equivale a 112,12 kW_p de potência a ser instalada. De forma análoga para o melhor cenário, a capacidade de hospedagem é de 135,44 kW_p , pela mesma razão que esta potência leva uma corrente fundamental de 355 A da mesma ordem harmônica anterior de 24,8 A (7% de 355 A). Portanto, verificou-se um intervalo na capacidade de hospedagem da barra em questão. Conclui-se que apesar da capacidade local do prédio ser de 60 kW_p , se fossem instaladas potências dessa ordem não haveria agressão dos limites de distorção harmônica individual de tensão na barra. A figura 5.47 mostra o comportamento da capacidade de hospedagem com relação à 9ª harmônica no que diz respeito à medição.

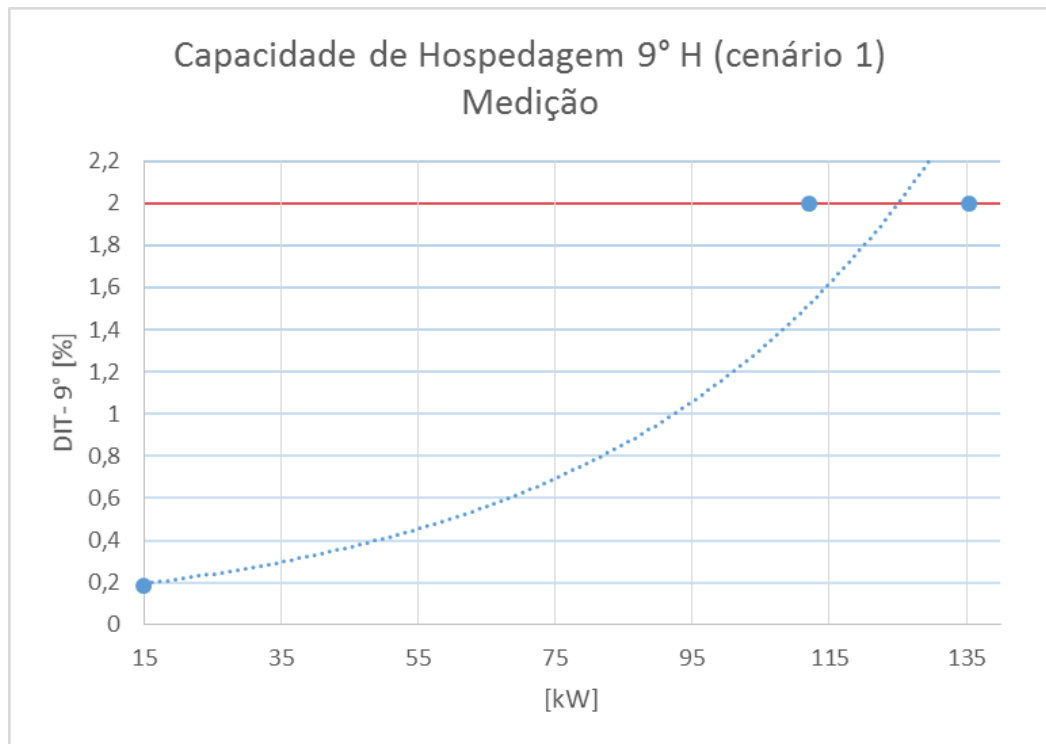


Figura 5.47–Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 15 kWp (Medição).

Na etapa 2, estimaram-se a impedância harmônica em valores por unidade (Bases: 220V e 150 kVA) vista pela barra 7, os valores de tensão através dos resultados de simulação e a corrente harmônica injetada calculada através da equação (4.2.5).

Tabela 5.19–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 15 kWp (Simulação).

h	Z (p.u)	Vh [V]	V u-h	I u-h
2	53,1713	0,07	0,00032	0,00399
3	77,5189	0,167	0,00076	0,00653
5	131,125	0,243	0,0011	0,00562
7	184,551	0,126	0,00057	0,00207
9	231,89	0,092	0,00042	0,0012
11	290,111	0,126	0,00057	0,00132
13	341,38	0,052	0,00024	0,00046

Através das equações (4.2.9) e (4.2.10) o método é aplicado agregando ambos os extremos dos valores para ambos os limites de corrente (melhor e pior cenário) para as 7 ordens harmônicas mencionadas.

Os resultados de avaliação da capacidade de hospedagem harmônica, com relação à simulação, são apresentadas na Tabela 5.20 para ambas as situações. Nesta tabela, a capacidade de hospedagem harmônica é apresentada em termos da corrente harmônica.

Tabela 5.20 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp (Simulação).

h	I u-h	V limite/Z u-h	IHC pior [A]	IHC melhor [A]
2	0,0039894	0,313452307	121,8194297	124,9602621
3	0,0065282	0,55900346	217,4807232	222,6203653
5	0,0056158	0,381316411	147,89378	152,3150371
7	0,0020689	0,234804237	91,61577757	93,24461742
9	0,0012022	0,057498651	22,16096263	23,10748472
11	0,0013161	0,103408731	40,1885465	41,22471529
13	0,0004616	0,078114275	30,56781926	30,93122269

Observando a corrente harmônica de 9ª ordem, nota-se que a máxima corrente que pode ser injetada na barra 7 para a pior situação é da ordem de 22,16 A e para a melhor situação 23,1 A. Isso significa que estas correntes são capazes de conduzir a tensão harmônica de 9ª ordem para a tensão limite, ou seja, de 2% de distorção harmônica de tensão limitada pelo PRODIST.

Averigua-se que através da IEEE 519 para o PAC com níveis de tensão entre 120 V e 69 kV que o usuário pode limitar as correntes harmônicas conforme apresentado na Tabela 5.18 anteriormente.

Novamente, pela Tabela 5.18, tem-se que a distorção harmônica de corrente para a razão calculada anteriormente entre as correntes calculadas no PAC e para ordens harmônicas menores que a 9ª é igual a 7%. Desta forma, este valor será usado para o cálculo da capacidade de hospedagem em termos de potência injetada.

Para o pior cenário a corrente de 9ª harmônica, cujo valor é 22,16 A, equivale a 7% da corrente total, ou seja, 316 A. Com isso, a capacidade de hospedagem para esta barra no pior cenário equivale a 120,63 kW_p de potência a ser instalada. De forma análoga para o melhor cenário, a capacidade de hospedagem é de 125,78 kW_p pela mesma razão que esta potência leva uma corrente fundamental de 330,1 A da mesma ordem harmônica anterior de 23,1 A (7% de 355 A). Portanto, verificou-se um intervalo na capacidade de hospedagem da barra em questão. Conclui-se que, apesar da capacidade local do prédio ser de 60 kW_p, se fossem instaladas potências dessa ordem não haveria agressão dos limites de distorção harmônica

individual de tensão na barra. A Figura 5.48 mostra o comportamento da capacidade de hospedagem com relação à 9ª harmônica no que diz respeito à simulação.

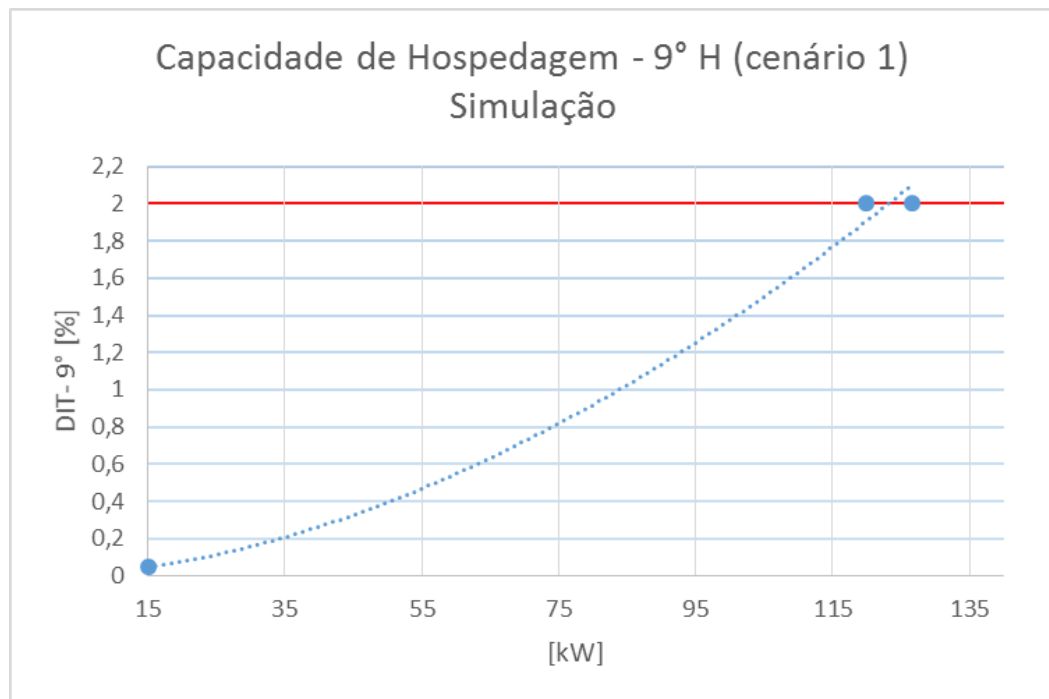


Figura 5.48 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 15 kWp (Simulação).

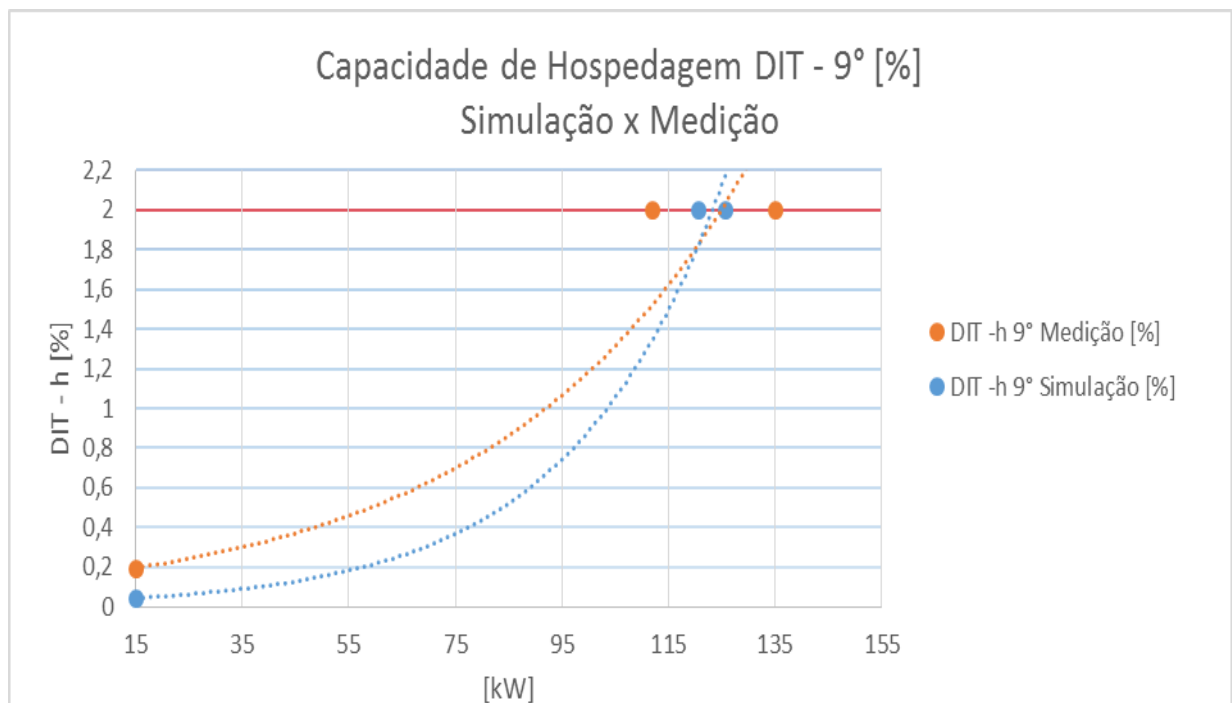


Figura 5.49–Comparação entre os valores simulados e medidos para 15 kWp.

Nota-se, através da Figura 5.49, que existe uma divergência entre os valores simulados com os valores medidos no que diz respeito à tensão harmônica vista na barra do CERIn

(barra 7). A divergência encontrada está nos valores usados para a simulação, devido a algumas incertezas das características do campus da UNIFEI, devido a grandes dificuldades para encontrar informações com os responsáveis. Outro detalhe é que foram agregados os valores de impedância harmônica da simulação com os valores de tensão harmônica medida. Portanto, valores típicos e aproximados foram adotados, porém nota-se que para a convergência no resultado final o erro entre os valores de capacidade de hospedagem medido e simulado encontra-se por volta de 7 %. Tais erros estão relacionados a incertezas das características das cargas, modelagem precisa dos cabos, fontes de corrente harmônica injetada pelo prédio, etc.

A Tabela 5.21 apresenta esta comparação entre os valores medidos e simulados.

Tabela 5.21–Correlação entre os Valores Medidos e Simulados.

	HC Medição [kW]	HC Simulação [kW]	erro[%]
Pior cenário	112,12	120,6	7,03151
Melhor cenário	135,2	125,78	7,48927

Portanto, valida-se a característica da curva encontrada entre a medição com a simulação e assim, são apresentados os próximos cenários em análise.

5.5.2.3 Cenário 2 – Aplicação da Metodologia para os Resultados de Simulação para Geração de 30 kWp

Para o cenário 2, na Tabela 5.22 estimou-se a impedância harmônica em valores por unidade (Bases: 220V e 150 kVA) vista pela barra 7. Os valores de tensão são dos resultados de medição e a corrente harmônica injetada foi calculada através da equação (4.2.5).

Tabela 5.22–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 30 kWp.

h	Z (p.u)	Vh [V]	V u-h	I u-h
2	0,07959	0,014	6,4E-05	0,0008
3	0,11602	0,337	0,00153	0,0132
5	0,19736	5,792	0,02633	0,1334
7	0,27617	0,48	0,00218	0,0079
9	0,34661	0,183	0,00083	0,0024
11	0,43413	0,153	0,0007	0,0016
13	0,51328	0,133	0,0006	0,00118

Através das equações (4.2.9) e (4.2.10) o método é aplicado agregando ambos os extremos dos valores para ambos os limites de corrente (melhor e pior cenário) para as 7 ordens harmônicas mencionadas.

Tabela 5.23 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 15 kWp.

h	I u-h	V limite/Z u-h	IHC pior [A]	IHC melhor [A]
2	0,0008	0,314125205	123,3399733	123,9694883
3	0,0132	0,560255959	215,3461621	225,7410138
5	0,1334	0,380014289	97,08056508	202,1030964
7	0,0079	0,235366538	89,54156404	95,76152797
9	0,0024	0,057701823	21,76949774	23,65890636
11	0,0016	0,103654763	40,17288177	41,43408027
13	0,00118	0,077930463	30,21352046	31,14080746

Os resultados de avaliação de capacidade de hospedagem harmônicas, com relação à simulação, são apresentadas na Tabela 5.23 para ambas as situações. Nesta tabela, a capacidade de hospedagem harmônica é apresentada em termos da corrente harmônica.

Observando-se a corrente harmônica de 9ª ordem, nota-se que a máxima corrente que pode ser injetada na barra 7 para a pior situação é da ordem de 21,76 A e para a melhor situação 23,65 A. Isso significa que estas correntes são capazes de conduzir a tensão harmônica de 9ª ordem para a tensão limite, ou seja, de 2% de distorção harmônica de tensão limitada pelo PRODIST.

Através da IEEE 519 para o PAC com níveis de tensão entre 120 V e 69 kV, o usuário pode limitar as correntes harmônicas conforme apresentado na Tabela 5.18 da seção 5.5.2.1.

Pela Tabela 5.18, tem-se que a distorção harmônica de corrente para a razão calculada anteriormente entre as correntes calculadas no PAC e para ordens harmônicas menores que 9ª é igual a 7%. Logo, este valor será usado para o cálculo da capacidade de hospedagem em termos de potência injetada.

Para o pior cenário a corrente de 9ª harmônica, cujo valor é 21,76 A, equivale a 7% da corrente total, ou seja, 310 A. Sendo assim, a capacidade de hospedagem para esta barra no pior cenário equivale a 118,5 kW_p de potência a ser instalada. De forma análoga para o melhor cenário, a capacidade de hospedagem é de 128,78 kW_p pela mesma razão que esta potência leva uma corrente fundamental de 337,9 A da mesma ordem harmônica anterior de 23,65 A (7% de 337,9 A). Portanto, verificou-se um intervalo na capacidade de hospedagem da barra em questão. Conclui-se que apesar da capacidade local do prédio ser de 60 kW_p, se fossem instaladas potências dessa ordem, não haveria agressão dos limites de distorção harmônica individual de tensão na barra. A Figura 5.50 mostra o comportamento da capacidade de hospedagem com relação à 9ª harmônica e a inserção de 30 kW_p.

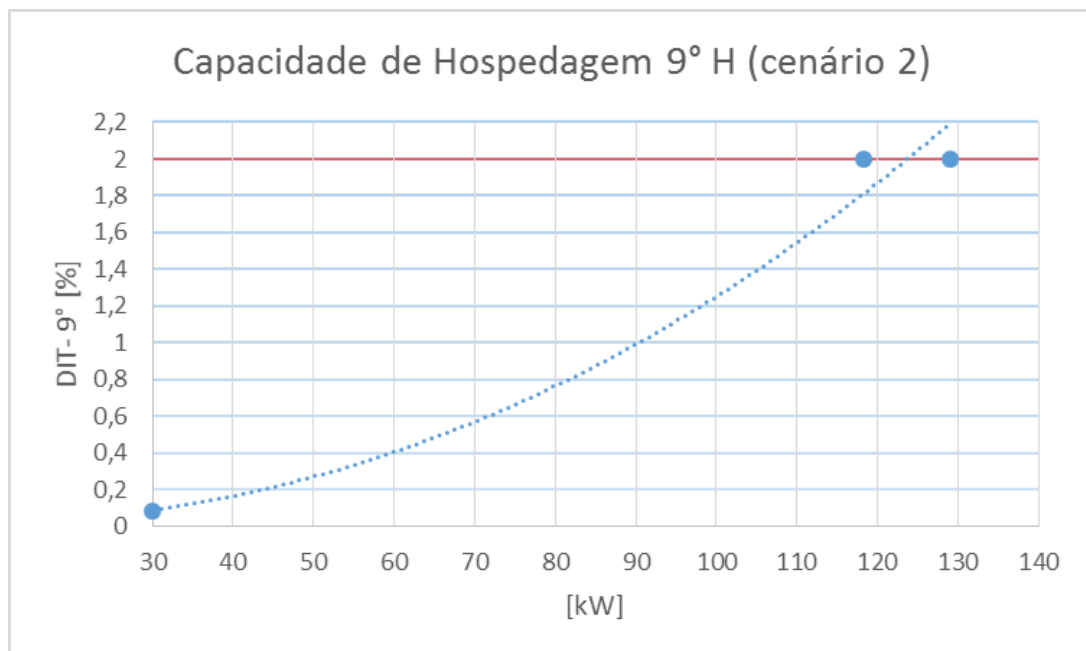


Figura 5.50 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 30 kW_p.

5.5.2.4 Cenário 3 – Aplicação da Metodologia para os Resultados de Simulação para Geração de 45 kW_p

Para o cenário 3, a Tabela 5.24 estimou a impedância harmônica em valores por unidade (Bases: 220V e 150 kVA) vista pela barra 7. Os valores de tensão são dos resultados de medição e a corrente harmônica injetada foi calculada através da equação (4.2.5).

Tabela 5.24–Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 45 kW_p.

h	Z (p.u)	Vh [V]	V u-h	I u-h
2	0,07942	0,021	9,5E-05	0,0012
3	0,11576	0,505	0,0023	0,01983
5	0,19689	8,603	0,0391	0,19861
7	0,27551	0,716	0,00325	0,01181
9	0,34622	0,273	0,00124	0,00358
11	0,43311	0,209	0,00095	0,00219
13	0,51207	0,223	0,00101	0,00198

Através das equações (4.2.9) e (4.2.10) o método é aplicado agregando ambos os extremos dos valores para ambos os limites de corrente (melhor e pior cenário) para as 7 ordens harmônicas mencionadas.

Tabela 5.25 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 45kWp.

h	I u-h	V limite/Z u-h	IHC pior [A]	IHC melhor [A]
2	0,0012	0,314798026	123,4464376	124,3927326
3	0,01983	0,561508263	213,2307183	228,842391
5	0,19861	0,380916393	71,76551543	228,1283695
7	0,01181	0,235928969	88,222804	97,52308781
9	0,00358	0,057767422	21,3291098	24,15094017
11	0,00219	0,103900854	40,03690205	41,76380589
13	0,00198	0,078114275	29,97030016	31,52874179

Os resultados de avaliação de capacidade de hospedagem harmônica, com relação à simulação, são apresentadas na Tabela 5.47 para ambas as situações. Nesta tabela, a capacidade de hospedagem harmônica é apresentada em termos da corrente harmônica.

Observando a corrente harmônica de 9ª ordem, nota-se que a máxima corrente que pode ser injetada na barra 7 para a pior situação é da ordem de 21,32 A e para a melhor situação 24,15 A. Isso significa que estas correntes são capazes de conduzir a tensão harmônica de 9ª ordem para a tensão limite, ou seja, de 2% de distorção harmônica de tensão limitada pelo PRODIST.

Através da IEEE 519 para o PAC com níveis de tensão entre 120 V e 69 kV, o usuário pode limitar as correntes harmônicas conforme apresentado na Tabela 5.18 da seção 5.3.2.1.

Pela Tabela 5.18, tem-se que a distorção harmônica de corrente para a razão calculada anteriormente entre as correntes calculadas no PAC e para ordens harmônicas menores que 9ª é igual a 7%. Logo, este valor será usado para o cálculo da capacidade de hospedagem em termos de potência injetada.

Para o pior cenário a corrente de 9ª harmônica, cujo valor é 21,39 A, equivale a 7% da corrente total, ou seja, 304,7 A. Sendo assim, a capacidade de hospedagem para esta barra no pior cenário equivale a 116,10 kW_p de potência a ser instalada. De forma análoga para o melhor cenário, a capacidade de hospedagem é de 131,46 kW_p pela mesma razão que esta potência leva uma corrente fundamental de 345,01 A da mesma ordem harmônica anterior de 24,15 A (7% de 345,01 A). Portanto, verificou-se um intervalo na capacidade de hospedagem da barra em questão. Conclui-se que, apesar da capacidade local do prédio ser de 60 kW_p se fossem instaladas potências dessa ordem não haveria agressão dos limites de distorção harmônica individual de tensão na barra. A Figura 5.51 mostra o comportamento da capacidade de hospedagem com relação à 9ª harmônico e a inserção de 45 kW_p .

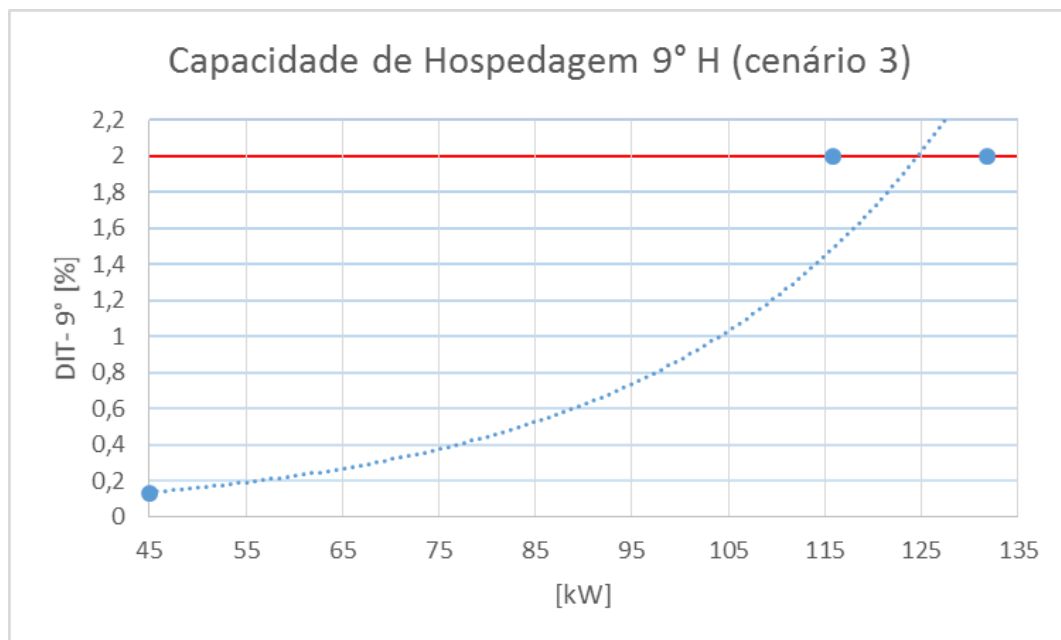


Figura 5.51 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 45 kW_p .

5.5.2.5 Perfil da Capacidade de Hospedagem com relação ao CERIn

Através da Figura 5.52, comparou-se os resultados da simulação para o acréscimo de PVs entre 15 e 45 kW_p . Nota-se a existência de uma característica exponencial na elevação do limite de distorção individual da tensão com relação à 9ª harmônica. É notável também que quanto mais PV se insere na barra maior, será a faixa limite que permite a distorção individual imposta por norma. Conclui-se que a curva teórica apresentada na a secção 4.2 pela Figura 4.2

está coerente com o que foi obtido em simulação. Através da curva pode-se prever futuras distorções harmônicas com variações de potência dos PVs.

É interessante notar que podem ser traçadas curvas para todas as faixas de harmônicas citadas para os cenários.

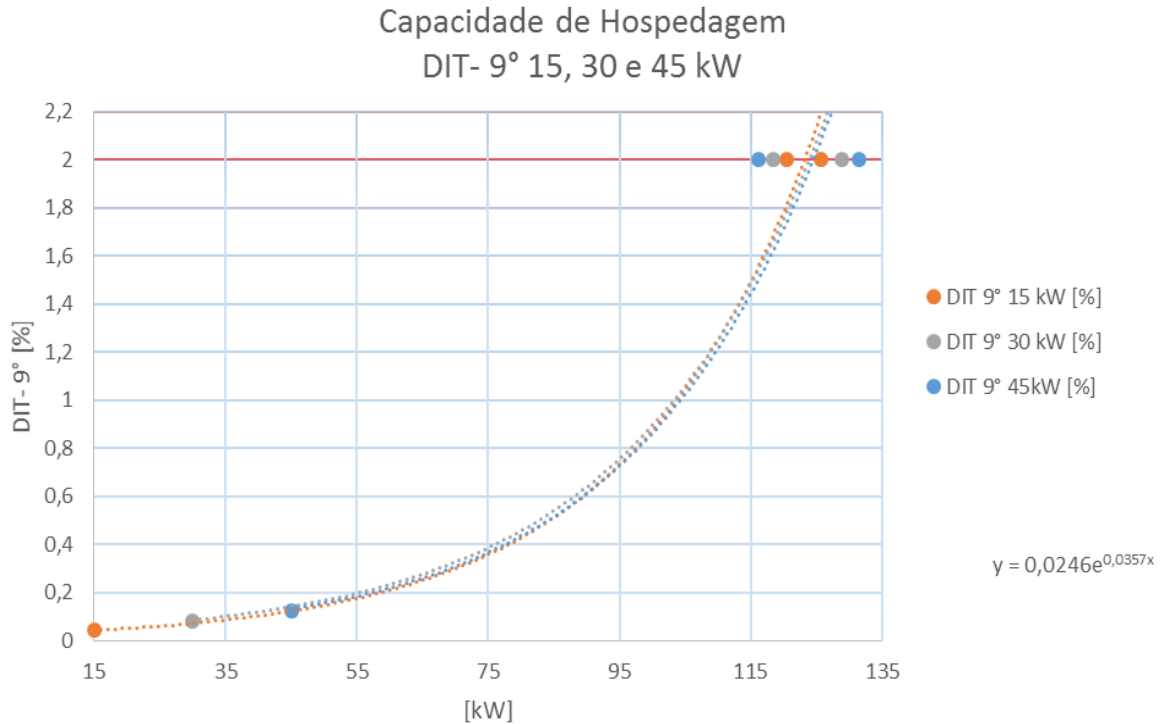


Figura 5.52 – Perfil da Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão.

5.5.2.6 Cenário 4 – Aplicação da Metodologia para os Resultados de Simulação para Geração de 180 kWp em torno do Alimentador 4 e o Impacto na barra de 13,8 kV

Para o cenário 4, a Tabela 5.26 estimou a impedância harmônica em valores por unidade (Bases: 13,8 kV e 100 MVA) vista pela barra 1 (Barra da CEMIG – B1). Os valores de tensão são dos resultados de medição e a corrente harmônica injetada foi calculada através da equação (4.2.5).

Tabela 5.26 – Cálculo da Corrente de Contribuição Harmônica para 180 kWp.

h	Z (p.u)	Vh [V]	V u-h	I u-h
2	1,1158	0,000001	7,2464E-11	6,4943E-11
3	2,0144	0,000001	7,2464E-11	3,5973E-11
5	2,788	21,393	0,00155022	0,00055603
7	3,9041	2,33	0,00016884	4,3247E-05
9	6,0371	0,00001	7,2464E-10	1,2003E-10
11	6,1344	17,203	0,00124659	0,00020321
13	7,2493	8,915	0,00064601	8,9114E-05

Através das equações (4.2.9) e (4.2.10) o método é aplicado agregando ambos os extremos dos valores para ambos os limites de corrente (melhor e pior cenário) para as 7 ordens harmônicas mencionadas.

Tabela 5.27 – Capacidade de Hospedagem para o Melhor e Pior Cenário – 180 kWp

h	V limite/Z u-h	IHC pior [A]	IHC melhor [A]
2	0,017924359	74,99009836	74,99009891
3	0,024821287	103,8447577	103,844758
5	0,021520803	87,71026377	92,36280379
7	0,012807049	53,39988786	53,76175253
9	0,002484637	10,39496795	10,39496895
11	0,005797486	23,40474166	25,10511111
13	0,004138331	16,94069756	17,68635004

Os resultados de avaliação de capacidade de hospedagem harmônicas, com relação à simulação, são apresentadas na Tabela 5.27 para ambas as situações. Nesta tabela, a capacidade de hospedagem harmônica é apresentada em termos da corrente harmônica.

Observando a corrente harmônica de 9ª ordem, nota-se que a máxima corrente que pode ser injetada na barra 1 para a pior e a melhor situação é na ordem de 10,394 A. Isso significa que estas correntes são capazes de conduzir a tensão harmônica de 9ª ordem para a tensão limite, ou seja, de 2% de distorção harmônica de tensão limitada pelo PRODIST.

Através da IEEE 519 para o PAC com níveis de tensão entre 120 V e 69 kV, o usuário pode limitar as correntes harmônicas conforme apresentado na Tabela 5.18 da seção 5.3.2.1.

A razão entre a corrente de curto-circuito e da máxima demanda local na barra de 13,8 kV é em torno de 221 e através da Tabela 5.27 tem-se que a distorção harmônica de corrente para a razão calculada entre as correntes calculadas no PAC e para ordens harmônicas menores que 9ª é igual a 12%. Logo, este valor será usado para o cálculo da capacidade de hospedagem em termos de potência injetada.

Para o pior cenário e melhor cenário, a corrente de 9ª harmônica, cujo valor é 10,39 A, equivale a 12% da corrente total, ou seja, 83,94 A. Sendo assim, a capacidade de hospedagem para ambos os cenários para esta barra equivale a 2,07 MW de potência a ser instalada, portanto, esta é a capacidade de hospedagem da barra em questão. A Figura 5.53 mostra o comportamento da capacidade de hospedagem com relação à 9ª harmônica.

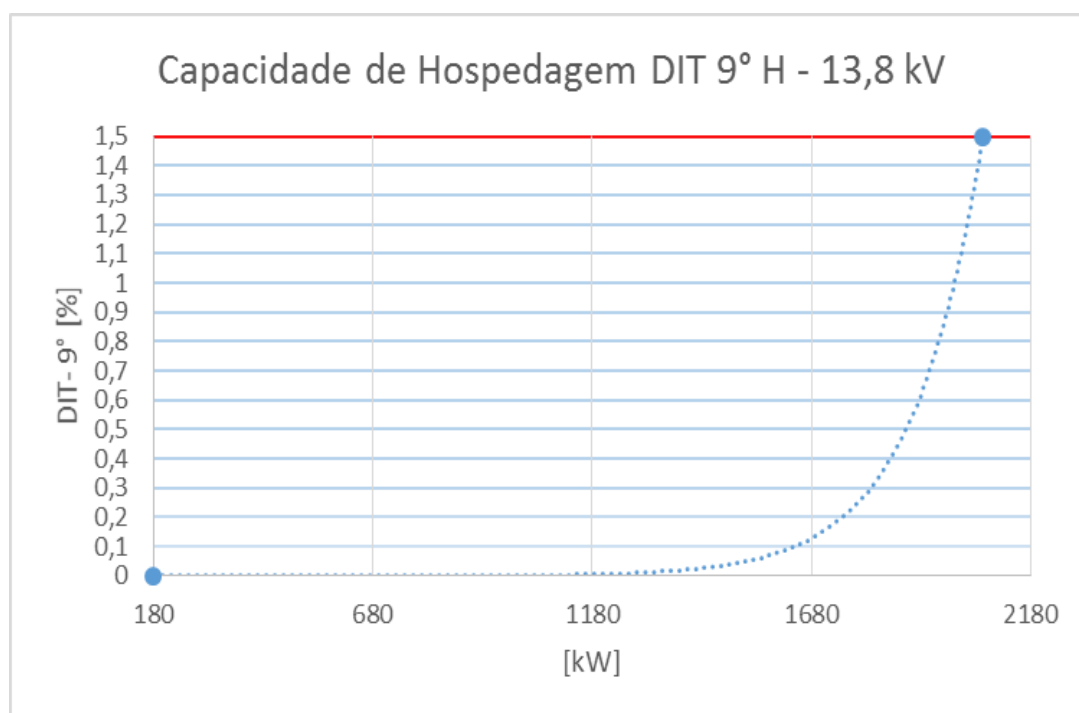


Figura 5.53 – Capacidade de Hospedagem com Relação à 9ª Harmônica de Tensão para 180 kWp.

5.6 Considerações Finais

Conforme resultados apresentados neste capítulo, a partir de medições analisou-se o comportamento do sistema elétrico através dos índices de QEE e também fez-se uma estimativa prévia da capacidade de hospedagem através da metodologia proposta com relação às sobretensões permitidas em sistemas de BT. Em seguida, fez-se uma análise para a validação da simulação através da medição que ocorreu para a barra do CERIn com relação às distorções harmônicas em todos os cenários. A diferença entre resultados de medição e simulação, no início, foi comprovada estatisticamente pelo estudo aplicado, e pode ser justificada por alguns fatores, entre estes:

- A rede modelada na simulação pode não corresponder exatamente à rede medida, pois a dinâmica dos sistemas de distribuição produz alterações constantes na configuração da rede que não foram consideradas nas simulações;

-
- Através da rede modelada, para ambas as análises, considerou-se a impedância harmônica vista pela barra do CERIn com base em resultados de simulação. Não foi possível aplicar um método de estimação da impedância harmônica vista pela barra através de medições locais;
 - Na aplicação da metodologia da capacidade de hospedagem local do CERIn com relação às distorções harmônicas, mesclou-se o resultado obtido de impedância harmônica para os valores de tensões harmônicas medidas e simuladas;
 - Mesmo com a divergência inicial entre os valores da distorção harmônica de 9º ordem, ambos os resultados convergiram para o mesmo ponto, ou seja a mesma capacidade de hospedagem;
 - Por fim, conseguiu-se obter uma estimativa da capacidade de hospedagem da rede elétrica da UNIFEI com relação ao montante de potência a ser instalada considerando a barra de 13,8 kV do sistema.

6. CONCLUSÕES

6.1 Conclusões Gerais

Esta dissertação apresentou aplicações de uma metodologia de estudo e análise da capacidade de hospedagem de fontes de geração distribuída no sistema de distribuição de energia elétrica, considerando a instalação de PVs no CERIn e futuramente dentro de todo o campus da UNIFEI.

A utilização de métodos de análise através de medições e também de simulações constitui uma importante alternativa para uma prévia análise da capacidade de hospedagem de um local na rede de distribuição, evitando-se impactos adversos que podem vir acontecer com a inserção das gerações distribuídas nestes sistemas.

Como a maior parte dos trabalhos publicados sobre simulações consideram índices de QEE em redes de distribuição e transmissão, este trabalho apresentou a aplicação de duas metodologias consolidadas para criação de limites no que diz respeito à inserção de novas fontes de geração distribuída dentro de um campus universitário. Dentre essas metodologias, foram analisadas a proposta de cálculo da capacidade de hospedagem para sobretensões permitidas a partir de uma fonte geradora já existente e também no que diz respeito a distorções harmônicas e, finalmente, uma análise da expansão dessas fontes em torno de todo o alimentador conectado ao CERIn, resultando para o CERIn numa capacidade de hospedagem de geração distribuída de $48 kW_p$ e para a UNIFEI de $2 MW_p$.

Um dos destaques deste trabalho está na análise dos índices de QEE através de medições ocorridas no CERIn no período de uma semana conforme o que é proposto pelo PRODIST, no qual foi observado o comportamento do PV instalado mostrando que a instalação está adequada dentro do que é sugerido pelos procedimentos de rede.

Neste trabalho se destaca também a contribuição na aplicação das metodologias de cálculo via medição e simulação para a capacidade de hospedagem. Observou-se que a contribuição da literatura adequou-se com o que foi encontrado na medição olhando o lado das sobretensões permitidas e podendo assim, estimar o quanto de PV seria possível inserir no CERIn sem que seja violado a faixa de sobretensão permitida por norma. Em seguida, observou-se outra metodologia proposta com relação às distorções harmônicas individuais buscando validar a simulação com a medição e também estimar a quantidade de PVs sem que houvesse violação dos índices propostos por norma. A diferença entre resultados de medição

e simulação, no início, foi comprovada estatisticamente pelo estudo aplicado, e pode ser justificada por alguns fatores, entre estes:

- A rede modelada na simulação pode não corresponder exatamente à rede medida, pois a dinâmica dos sistemas de distribuição produz alterações constantes na configuração da rede que não foram consideradas nas simulações;
- Através da rede modelada, para ambas as análises, considerou-se a impedância harmônica vista pela barra do CERIn com base em resultados de simulação. Não foi possível aplicar um método de estimação da impedância harmônica vista pela barra através de medições locais;
- Na aplicação da metodologia da capacidade de hospedagem local do CERIn com relação às distorções harmônicas, mesclou-se o resultado obtido de impedância harmônica para os valores de tensões harmônicas medidas e simuladas;
- Mesmo com a divergência inicial entre os valores da distorção harmônica de 9º ordem, ambos os resultados convergiram para o mesmo ponto, ou seja a mesma capacidade de hospedagem;
- Por fim, conseguiu-se obter uma estimativa da capacidade de hospedagem da rede elétrica da UNIFEI com relação ao montante de potência a ser instalada considerando a barra de 13,8 kV do sistema.

Por último, verificou-se de uma forma geral o campus da UNIFEI no que diz respeito ao montante de potência de geração distribuída aplicada sem que houvesse a violação do índice de distorção harmônica individual com mais facilidade a ser superado.

Com as simulações feitas, houve uma análise para a validação da simulação através da medição que ocorreu para a barra do CERIn com relação às distorções harmônicas em todos os cenários. A diferença entre resultados de medição e simulação, no início, foi comprovada estatisticamente pelo estudo aplicado, pode ser justificada por alguns fatores mencionados nas considerações finais.

6.2 Proposta para Trabalhos Futuros

O setor elétrico necessita de uma padronização da metodologia e da integração dos critérios utilizados nas medições desses índices de desempenho para que ocorra maior confiabilidade e qualidade daquele sistema que será integrado, possibilitando que a implementação das fontes renováveis seja funcional e confiável.

Como proposta de trabalhos futuros, pode-se citar o desenvolvimento de uma metodologia global que seja capaz de integrar os critérios que fazem avaliação da capacidade de hospedagem de um sistema elétrico frente à inserção de fontes renováveis de energia, que seja capaz de analisar os índices em uma única plataforma, de forma a agregar uma otimização para um ponto ótimo de operação que atenda todos os critérios solicitados, e com isso prover a integridade do sistema e a qualidade de funcionamento e entrega da energia aos centros consumidores, no que diz respeito à necessária operação do sistema elétrico de forma segura, eficiente e confiável. O diferencial desta futura proposta, está na adequação da integração dos critérios individuais que avaliam o desempenho de um sistema elétrico quanto à confiabilidade e qualidade que não devem ser mais tratados individualmente, pois o sistema elétrico depende de um sistema integrado para que haja pleno funcionamento a fim de atender as demandas de desempenhos necessárias para a operação do sistema elétrico de uma *microgrid* ou de sistemas de grande porte.

6.3 Artigo Publicado

T. C. De Oliveira, B. D. Bonatto, J. M. C. Filho, P. F. Ribeiro, e I. N. Santos. Estudo da Capacidade de Hospedagem de Fontes de Geração Distribuída no Sistema Elétrico de um Campus Universitário. **Anais do CBQEE 2015 - XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Campina Grande-PB, Brasil, 07 a 10 de Julho de 2015.**

REFERÊNCIAS

ABDEL-SALAM, M.; ZIEDAN, H.; KAMEL, R. M.; SAYED, K. "Effect of Micro-Grid Renewable Micro-sources on Short Circuit Capacity of Hosting Distribution Networks." , 35th International Proceedings of Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC), n. October, p. 458–463, 2013.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. "Distributed generation: A definition." Electric Power Systems Research, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 1 – Introdução." , 2015.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição." , 2012.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica" , 2015.

ALTIN, M. "Distributed Generation Hosting Capacity Calculation of MV Distribution Feeders in Turkey." 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), p. 1–7, Instabul, 2014.

ANEEL. "Perguntas e Respostas sobre a aplicação da Resolução Normativa nº 482 / 2012." , p. 6, 2012. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/faq_482_18-12-2012.pdf. Acessado em 01/03/2015.

ALTIN, M. "Distributed Generation Hosting Capacity Calculation of MV Distribution Feeders in Turkey." 2014 IEEE PES Innovative Smart grid Technologies Conference Europe (ISGT - Europe), p. 1-7, Instabul, 2014.

BOLLEN, M. H. J.; YANG, Y.; HASSAN, F. "Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach." 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, p. 1–8, 2008.

BOLLEN, M.; HASSAN, F. Integration of Distributed Generation in the Power System, in: IEEE Press Series on Power Engineering, Wiley-Blackwell, New York, , p. 6–83, 2011.

CAPITANESCU, F.; OCHOA, L. F.; MEMBER, S.; MARGOSSIAN, H.; HATZIARGYRIOU, N. D. "Assessing the Potential of Network Reconfiguration to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems." IEEE Transactions on Power Systems, v. 30, n. 1, p. 1–11, 2014.

CEMIG. "ND.5.30 - Requisitos para a conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Baixa Tensão." Disponível em: <http://www.cemig.com.br/> Acessado em: 01/03/2015.

DRANETZ. "Power Guide 4400 Power Quality Analyzer" Disponível em: http://www.powercet.com/uploads/files/DB_PowerGuide_4400_Bruchure_8x11.pdf. Acessado em: 20/08/2015.

DRANETZ. "Power Xplorer@PX5 user Guide." Disponível em: <http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PX5-UsersGuide-RevJ.pdf>. Acessado em: 20/08/2015

DUDIAK, I. J. "Integration of renewable energy sources to the power system.", 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Krakow, p. 148–151, 2014.

ENGINEERING, E.; SOFTWARE, A. Power * Tools for Windows Tutorial. , 2012.

ENGINEERS, E.; AVENUE, T. P. "Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems." SCC 22 Committee of the IEEE Power Standards Coordinating Committee. v. 12, p. 124, 2012.

ESSLINGER, P.; WITZMANN, R. "Increasing grid transmission capacity and power quality by a new solar inverter concept and inbuilt data communication." IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe, p. 1–7, 2010.

ETHERDEN, N.; BOLLEN, M. H. J. "Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources." 2011 IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society, POWERTECH 2011, p. 1–7, 2011.

FRONIUS. "Fronius IG Plus V 3.0-1 / 3.8-1 / 5.0-1 / 6.0-1 / 7.5-1 / 10.0-1 / 10.0-3 / 11.4-1 / 11.4-3 / 12.0-3." Inverter for grid-connected photovoltaic systems. Disponível em: <http://www.fronius.com/cps/> Acessado em: 01/03/2015.

GONÇALVES, L. F. "Contribuições para o Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída." , Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de pós Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, Março de 2004.

GREENPEACE. "O Protocolo de Kyoto." Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/>. Acessado em: 15/06/2015.

HARRISON, G. P.; DJOKIC, S. Z. "Incorporating harmonic limits into assessment of the hosting capacity of active networks." CIRED 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid, v. 5, p. 325–325, 2012.

IEC Std 61000-4-30, "Electromagnetic Compatibility (EMC), part 4-30: Testing and measurement techniques – Power Quality measurement methods", Edition 1.1, 2003-02.

IEC Std 61000-4-7, "Electromagnetic Compatibility (EMC), part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto", Edition 2, 2002-8.

IEC Std 61000-4-11, "Electromagnetic Compatibility (EMC), part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity test", Edition 2, 2004.

IEEE Std 1159 -2014. "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality." Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.

IEEE Std 929 – 2015. "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems." Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.

IEEE Std 519 - 2015. "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems." Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015.

MEDEIROS, R. "Impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica na Qualidade de Energia em Rede de Distribuição de Energia Elétrica." Monografia do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2014.

MENNITI, D.; MERLO, M.; SCORDINO, N.; ZANELLINI, F. "Distribution network analysis: A comparison between hosting and loading capacities." SPEEDAM 2012 - 21st International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, p. 926–933, 2012.

MIGUEL, D.; CARVALHO, S. "Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Elétrica." Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores - MIEEC. Lisboa, Julho de 2011.

NACIONES UNIDAS. "Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 15º período de sesiones, celebrado en Copenhague del 7 al 19 de diciembre de 2009." Convención Marco sobre el Cambio Climático, 30 de Marzo de 2010.

PALUDO, J. A. "Avaliação dos Impactos de Elevados Níveis de Penetração da Geração Fotovoltaica no Desempenho de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica em Regime Permanente." , Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, UFSCAR, São Carlos, 2014.

RIBEIRO, P. F.; POLINDER, H.; VERKERK, M. "Planning and designing smart grids: Philosophical considerations." IEEE Technology and Society Magazine, v. 31, n. 3, p. 34–43, 2012.

RENOVA ENERGIA. "Proposta Técnico-Comercial de Fornecimento de Usina Fotovoltaica." CERIn, Itajubá, Fevereiro de 2015.

ROCHA, B. DE P. "Estudos Elétricos para Avaliação de Impacto da Geração Distribuída na Rede de Distribuição e na Formação de Microrredes", Dissertação de Mestrado, UFRJ/Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Junho de 2010.

RYLANDER, M.; SMITH, J.; SUNDERMAN, W. "Streamlined Method for Determining Distribution System Hosting Capacity." 2015 IEEE Rural Electric Power Conference, p. 3–9, 2015.

RYLANDER, M.; SMITH, J.; LEWIS, D.; STEFFEL, S. "Voltage impacts from distributed photovoltaics on two distribution feeders." IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 2–6, 2013.

SÁIZ-MARÍN, E.; MEMBER, S.; LOBATO, E.; EGIDO, I. "Local Hosting Capacity Increase by Means of Wind Farm Voltage Control Provision." , IEEE Transactions on Power Systems, v. 29, n. 4, p. 1731–1738, 2014.

SANTOS, I. N.; BOLLEN, M. H. J.; RIBEIRO, P. F. "Methodology for estimation of harmonic hosting capacity." Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, p. 708–712, 2014.

SANTOS, I. N.; ČUK, V.; ALMEIDA, P. M.; BOLLEN, M. H. J.; RIBEIRO, P. F. "Considerations on hosting capacity for harmonic distortions on transmission and distribution systems." Electric Power Systems Research, v. 119, p. 199–206, 2015.

SHAYANI, R. A. "Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição." Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Energia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF , 2010.

SOLANKI, S. K.; RAMACHANDRAN, V.; SOLANKI, J. "Steady state analysis of high penetration PV on utility distribution feeder. " PES T&D 2012, p. 1–6, 2012.

TREVISAN, A. S. "Efeitos da geração distribuída em sistemas de distribuição de baixa tensão." Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

VILLALVA, M. G. "Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico de Conectado à Rede Elétrica." Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação , Campinas, 2010.

ANEXO A – Entrada de Dados

A Figura A.1 mostra a tela principal do *software* SKM-PTW utilizado para modelagem da rede elétrica da UNIFEI, extração de dados e simulação de distorções harmônicas e potências de curto-circuito deste trabalho. Conforme mostrado na figura, o menu *principal* permite acessar todos os componentes que serão modelados na planta requerida, destacando no formato de tabela todos os parâmetros inseridos. Desta forma, neste ANEXO A serão mostradas as principais janelas de configuração para modelagem da rede da UNIFEI e o processo de simulação.

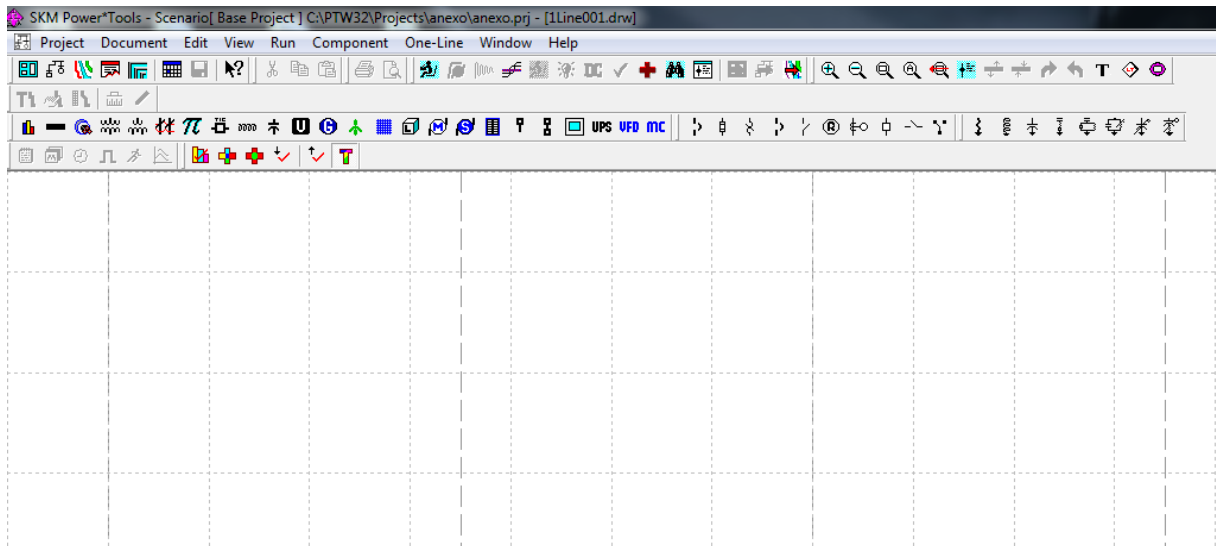


Figura A.1 - Tela principal de acesso ao *software* SKW-PTW.

Quanto à representação da fonte de entrada no *software* PTW-SKM a Figura A.2 mostra a caixa de diálogo com a aba de dados gerais para entrada do nome *Utility*, sua corrente de curto-circuito trifásica, corrente de curto circuito monofásica e a relação X/R de sequência positiva e zero. A Figura A.3 mostra a mesma caixa, porém na aba de impedância harmônica, na qual são calculados automaticamente os valores em p.u através dos dados de entrada da *Utility*. Vale ressaltar que o cálculo das impedâncias de sequência positiva é baseado na potências de curto circuito trifásica no formato $Z = R + j.X$ na frequência fundamental e para as faixas de frequências até a 49^o ordem, o modelo utiliza o formato de cálculo $Z_h = R + jhX$.

Component Subviews:

- Utility
- Harmonic Impedance
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...
Go To Jump...

U CEMIG

Expand Shrink

Name: CEMIG In Service Incomplete U

Initial Operating Conditions

Voltage: 1.000 pu Voltage Tolerance%: -----
Angle: 0.00 deg Min: 0.0 Max: 0.0

Enter MVA/kVA/Amps Enter Per Unit Update...

Utility Contribution

Contribution	X/R:	Tolerance%
Three Phase: 7487.0 Amps	28.000	Min: 0.0
Line to Ground: 7000.0 Amps	14.000	Max: 0.0

Per Unit Contribution

	R	X
Base/Rated MVA: 100.0	Pos: 0.019944	0.558439
Base/Rated Voltage (L-L): 13800	Zero: 0.087858	0.671579

Bus Connection

Bus: B13.8 Connection...

Figura A.2 - Caixa de diálogo para configuração da entrada da CEMIG.

Component Subviews:

- Utility
- Harmonic Impedance
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...
Go To Jump...

U CEMIG

Expand Shrink

Linear From Base User-Defined

Order	X Factor	Harmonic X	R Factor	Harmonic R
1	1.000	0.5584	1.000	0.0199
2	2.000	1.1169	1.000	0.0199
3	3.000	2.0147	1.000	0.0879
4	4.000	2.2338	1.000	0.0199
5	5.000	2.7922	1.000	0.0199
6	6.000	4.0295	1.000	0.0879
7	7.000	3.9091	1.000	0.0199
8	8.000	4.4675	1.000	0.0199
9	9.000	6.0442	1.000	0.0879
10	10.000	5.5844	1.000	0.0199
11	11.000	6.1428	1.000	0.0199
12	12.000	8.0589	1.000	0.0879
13	13.000	7.2597	1.000	0.0199
14	14.000	7.8181	1.000	0.0199

Figura A.3 – Cálculo da Impedância Harmônica pelo PTW vista da barra 13,8 kV.

A Figura A.4 mostra a caixa de diálogo para a representação de um transformador de dois enrolamentos. Nesta caixa configura-se o valor da potência do transformador, o nome e o circuito deste, além da tensão de ambos os lados e também sua conexão. As impedâncias em pu nas sequências positiva e zero são calculadas na mesma caixa de diálogo, porém em outra aba é informado o Z% e uma relação X/R típica, exemplificado pela Figura A5.

Component Subviews:

- 2-Winding Transformer
- Transformer Impedance
- Automatic LTC
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

CERIN

Expand Shrink

Name: CERIN In Service Incomplete Manufacturer: NONE Type: Do Not Size

Nominal kVA: 150.0 Full Load kVA: 182.0

Primary Secondary

Connection: Delta Wye-Ground

Rated Voltage: 13800 V (L-L) 220 V (L-L)

Bus Voltage: 13800.0 V (L-L) 220 V (L-L)

Full Load Amps: 7.6 477.6

Tap %: 0.00 0.00

Phase Shift Angle: 30.0 deg Link INST Protection

Bus Connection: From: BCERIN13 To: BCERIN220

Type: Three Phase Standard Shell Single Phase Mid Tap Single Phase

Figura A.4 - Caixa de diálogo para configuração de um transformador.

Component Subviews:

- 2-Winding Transformer
- Transformer Impedance
- Automatic LTC
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

CERIN

Expand Shrink

Sequence Impedance in Percent on Transformer Base

	% R	% X
Positive:	1.0746	3.8530
Zero:	1.0746	3.8530

Impedance Tolerance: +/- 0.00 %

Calculate from:

Neutral Impedance

	R (Ohms)	X (Ohms)
Primary:	0.00000	0.00000
Secondary:	0.00000	0.00000

No Load Loss in Percent on Transformer Base

P: 0.0000 + iQ: 0.0000

Sizing Info

Do Not Size

Sizing Criteria: Demand

Size To/LF Rating: Full Load kVA

Transformer Base: Nominal kVA

Figura A.5 - Caixa de diálogo para configuração de um transformador com relação às impedâncias.

Outras configurações realizadas no *software* PTW-SKM serão vistas nas Figuras A.6, A.7, A.8, A.9 e A.10 para representação de cabos, cargas equivalentes e do PV, fontes harmônicas, respectivamente.

Component Subviews:


- Cable
- Impedance
- Conductor and Raceway
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

C012

Expand Shrink

Name: C012 In Service 

Library... Link to Lib Data State: Incomplete

Manufacturer: IEEE 141 - Red Book Description: NEC Table 310-75

Conductor Type	Duct Material	Insul Type	Insul Class	Volts (L-L)
Copper	Non-Magnetic	EPR	MV	15000

Conductor Descr: 3/C Installation: Conduit in Air

Cable Size: 4 AWG Circular Mils: 41740

Conductors in Parallel/Phase: 1 Length: 1.0 Meters

Do Not Size

Bus Connection

Conn...

From: BUS-0010

To: BINCIT13

Phase

A

B

C

Matrix

Update Matrix from Sequence

Z Matrix...

Figura A.6 - Caixa de diálogo para configuração de cabos.

Component Subviews:

- Cable
- Impedance
- Conductor and Raceway
- Damage Curve
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

BINCIT13

Expand Shrink

Impedance

Units: Ohms/1000 Meters 3 Phase Single Phase

	R	X	
Positive:	1.0531	0.1624	Impedance Tolerance: +/- 0.0 %
Zero:	1.6273	0.4131	

PU...

Shunt Admittance

	G/2	B/2	
Positive:	0.000000	0.000090	Unit Converter...
Zero:	0.000000	0.000090	

Units: Mhos/1000 Meters

Figura A.7 - Caixa de diálogo para configuração da impedância dos cabos.

Component Subviews:


- General Load
- Load Diversity
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Load Profile
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

BCERIN_CARGA

Expand Shrink

Name: CERIN_CARGA In Service 

Rated Size: 0.700 kVA Data State: Incomplete

Power Factor: 0.9900 Lag

Rated Voltage: 220 Volts (L-L)

Description:

Bus Connection: Connection... Phase: A B C Connection: Wye-Ground Wye Delta

Bus: BCERIN220

Figura A.8 - Caixa de diálogo para configuração da carga.

Component Subviews:


- Solar PV Generator
- PV Config and Module Lit
- PV Contribution
- Harmonic Source
- Reliability Data
- Optimal Power Flow
- User-Defined Fields
- Datablock

Scenario Manager...

Go To Jump...

PV 15 Kw

Expand Shrink

Name: PV 15 Kw In Service 

Rated Voltage: 220 V (L-L) Data State: Complete

Rated Size: 12.191 kW Library...

Power Factor: 1.000 Unity

Full Load Amps: 32.0 Link with SPV Config/Library

Initial Operating Conditions

kW: 12.191 kVar: 0.000

Bus Connection: Connection... Three Phase Wye-Ground

Bus: BCERIN220

Figura A.9 - Caixa de diálogo para configuração do PV.

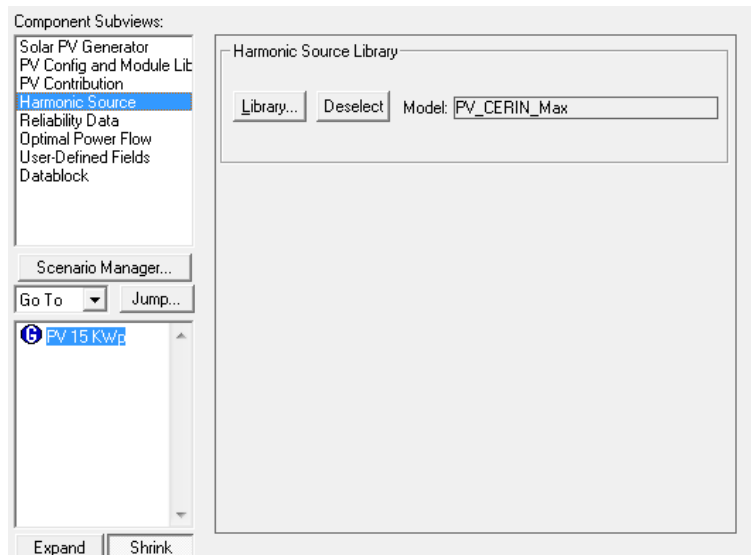


Figura A.10 - Caixa de diálogo para configuração da fonte harmônica equivalente ao PV

A Figura A.11 mostra a janela de configuração para escolha e parametrização de fontes harmônicas na biblioteca do PTW.

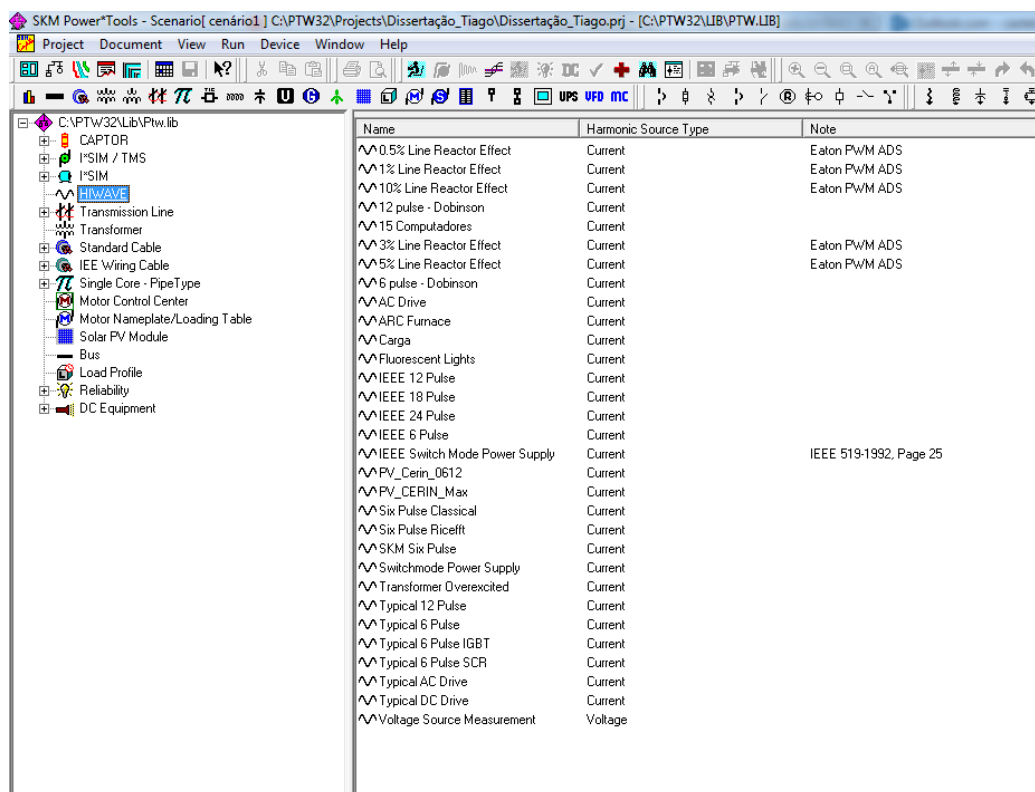


Figura A.11—biblioteca HI_WAVE.

Na Figura A.12 pode ser vista a janela de configuração do modelo de injeção de corrente harmônica do PV através do que foi obtido dos resultados de medição.

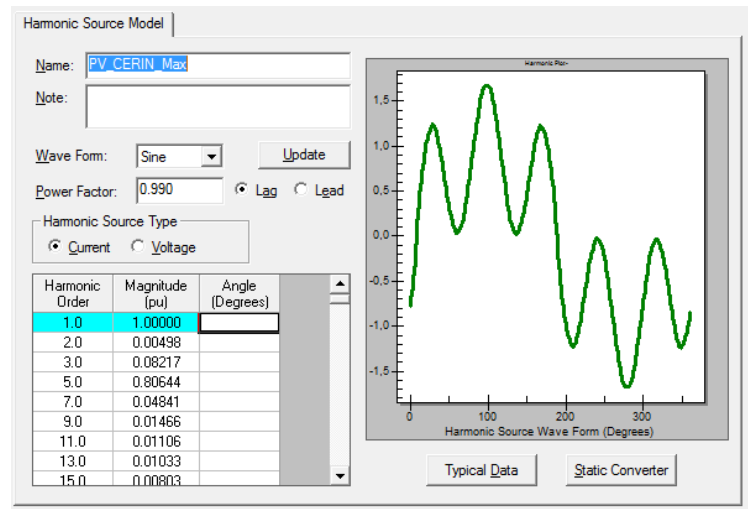


Figura A.12–Injeção harmônica de corrente do PV.

ANEXO B – Procedimento de Simulação

A Figura B.1 mostra o unifilar para o cenário 1 representando o caso de instalação de 15 kW do CERIn.

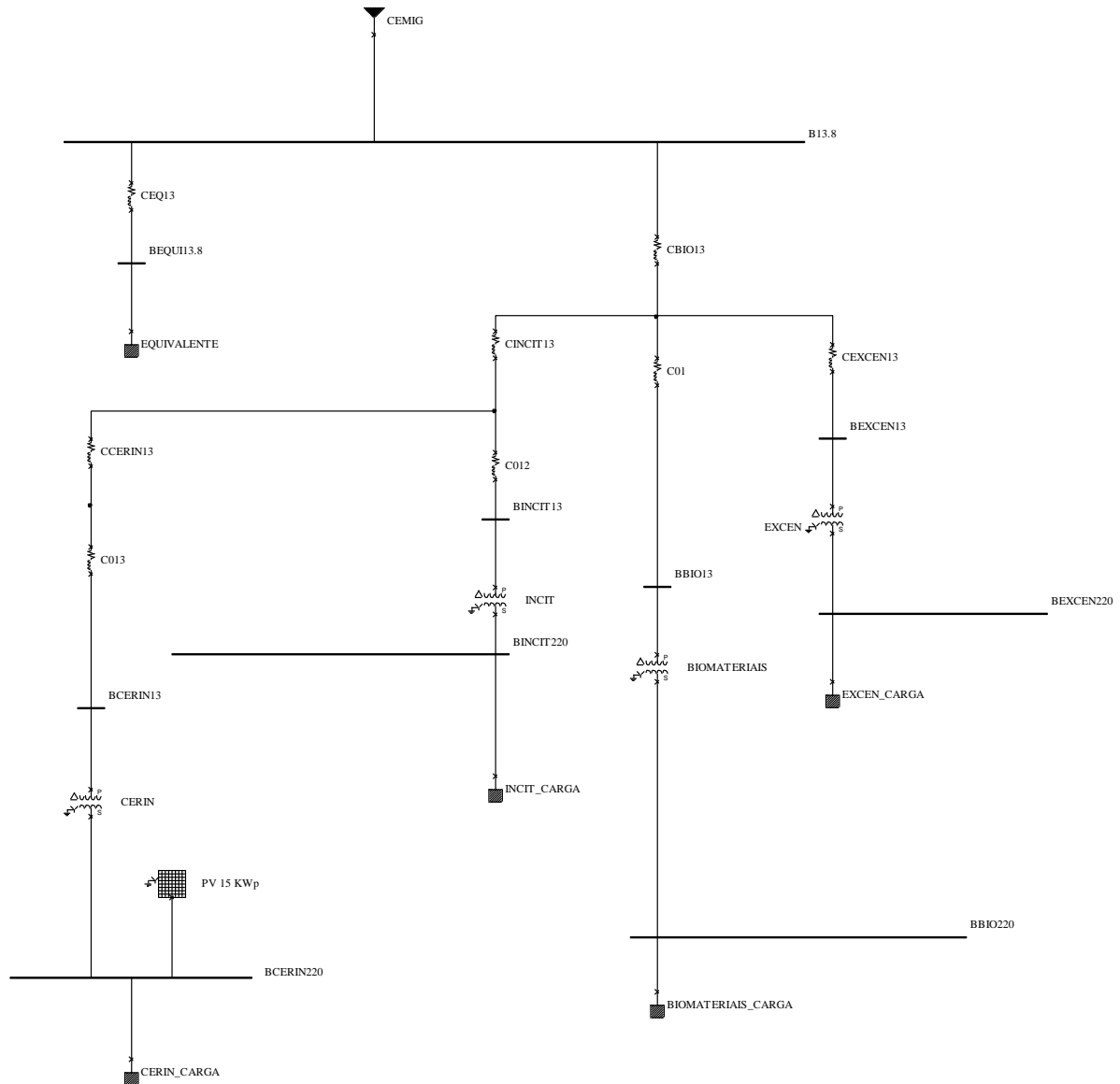


Figura B.1 – Cenário 1 – 15 kWp no CERIn.

Já nas Figuras B.2 – B.4 exemplificam um arquivo de saída através da simulação no que diz respeito às formas de onda de tensão, o espectro da forma de onda, impedância em módulo e ângulo vista pela barra do CERIn.

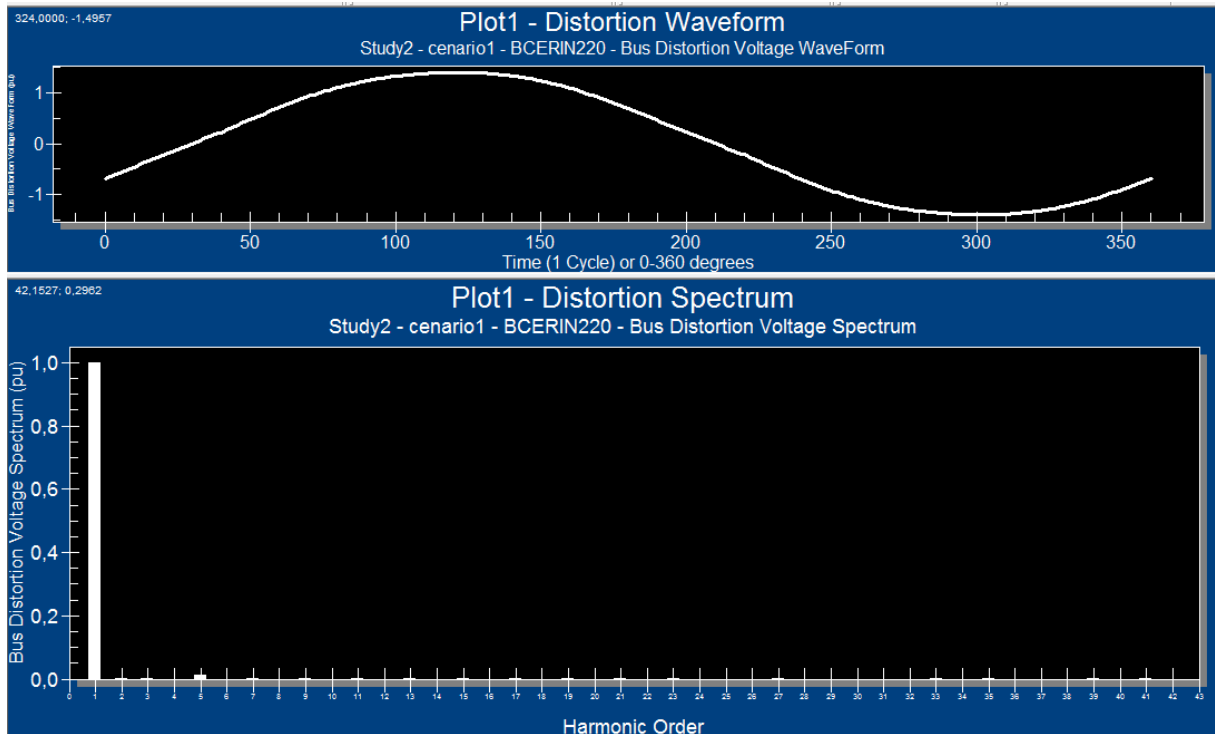


Figura B.2–Espectro de tensão.

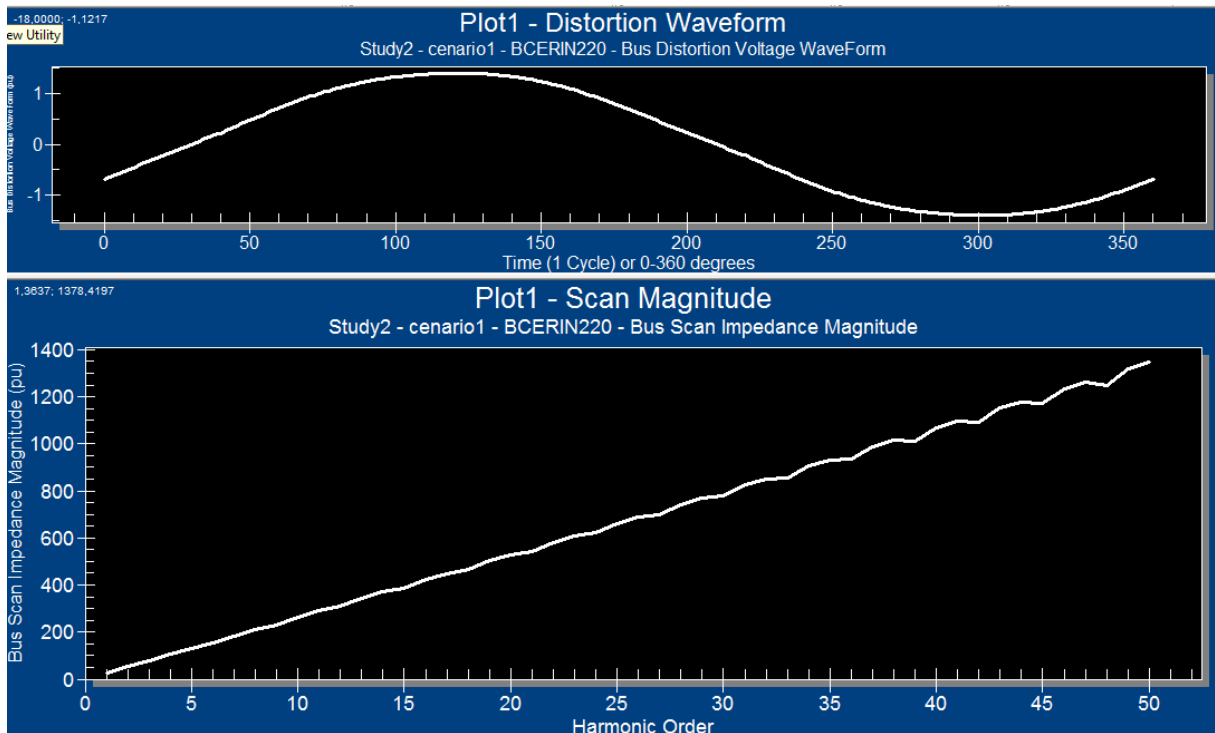


Figura B.3–Módulo da impedância harmônica.

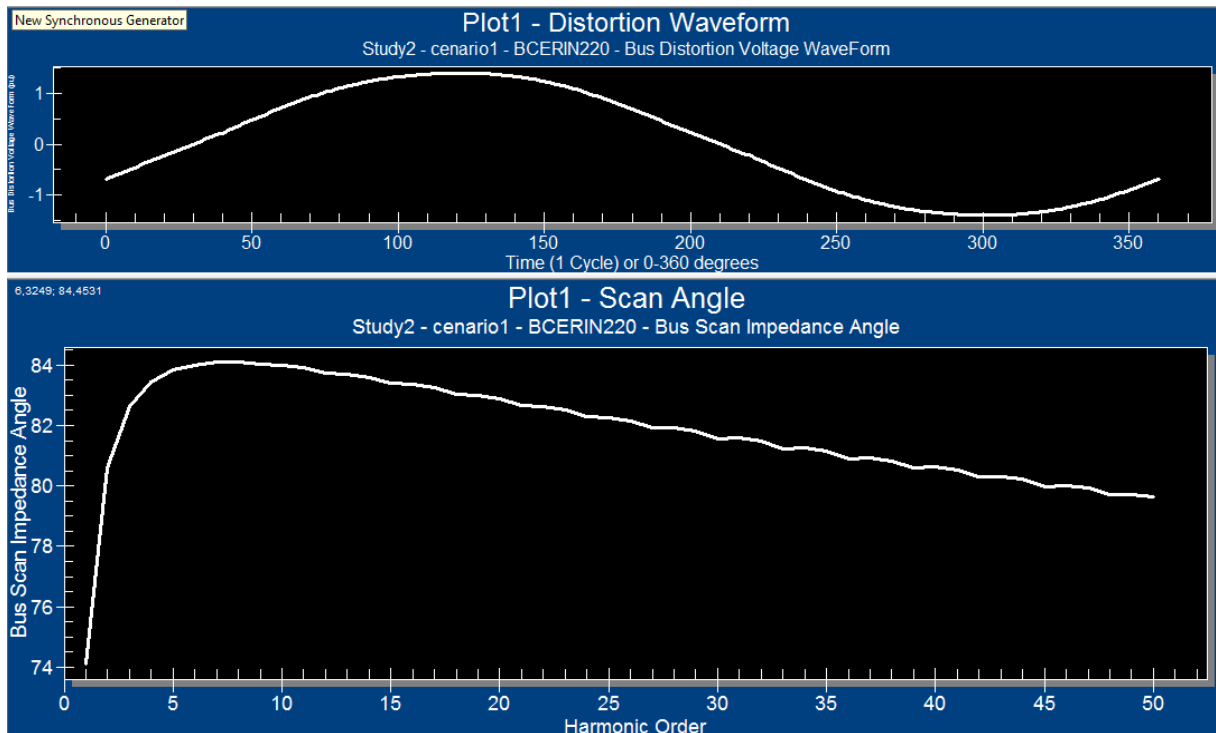


Figura B.4–fase da impedância harmônica.

A Figura B.5 mostra o diagrama unifilar para o cenário 2 representando o caso de instalação de 30 kW do CERIn.

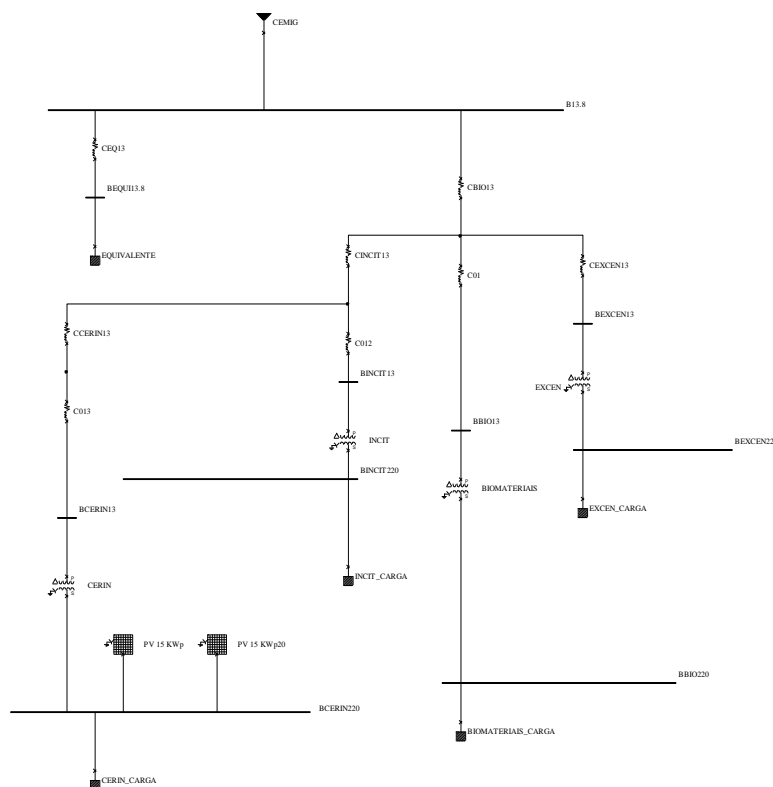


Figura B.5 – Cenário 2 – 30 kWp no CERIn.

Já nas Figuras B.6 – B.8 exemplificam um arquivo de saída através da simulação no que diz respeito às formas de onda de tensão, o espectro da forma de onda, impedância em módulo e ângulo vista pela barra do CERIn.

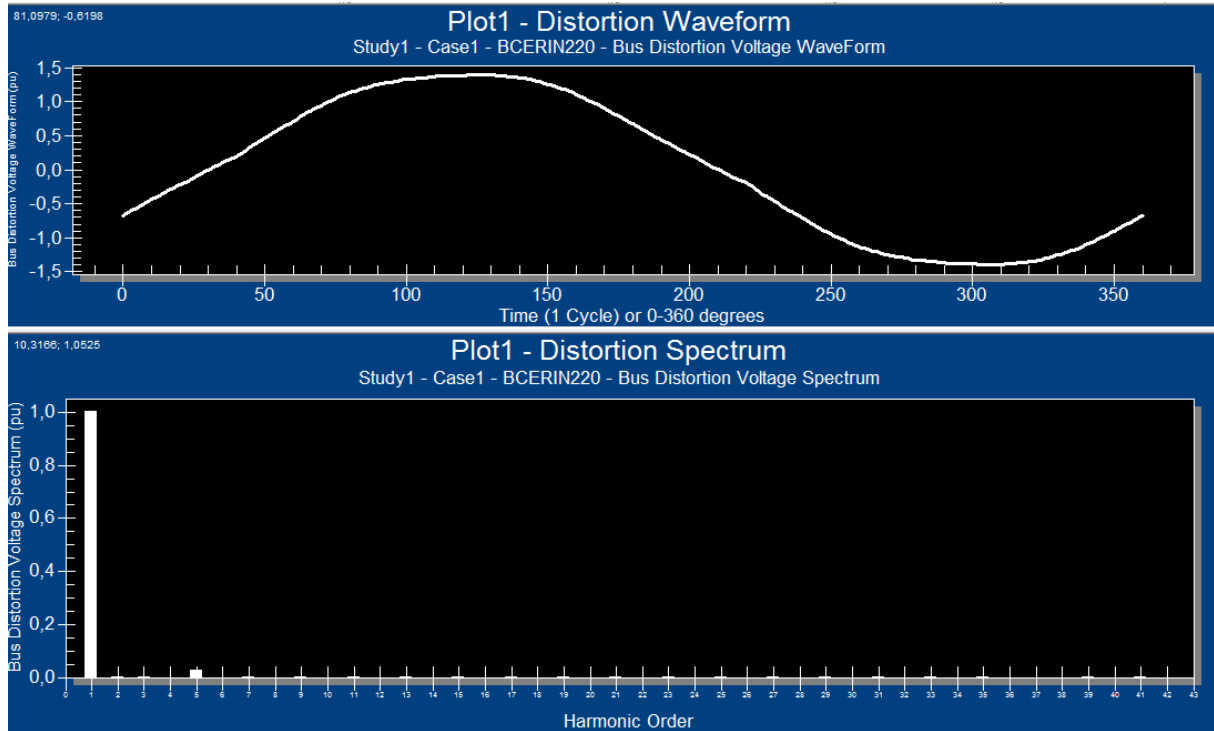


Figura B.6 - Espectro de tensão.

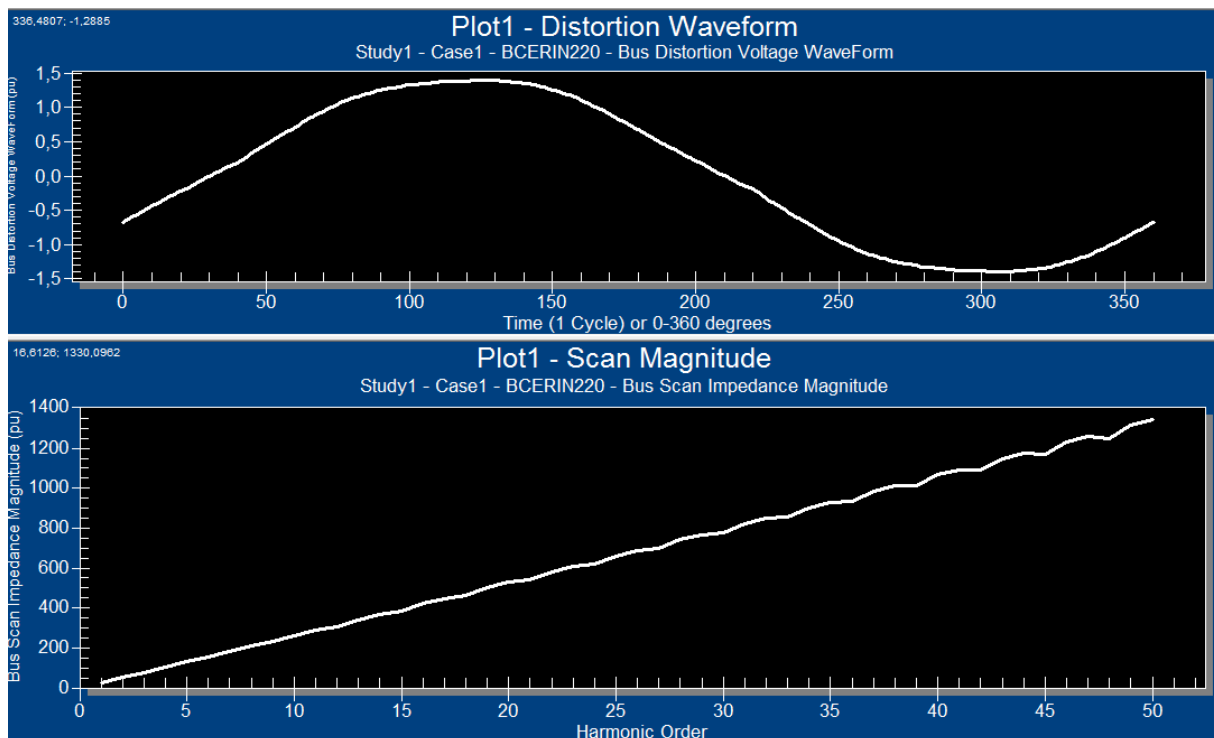


Figura B.7 - Módulo da impedância harmônica.

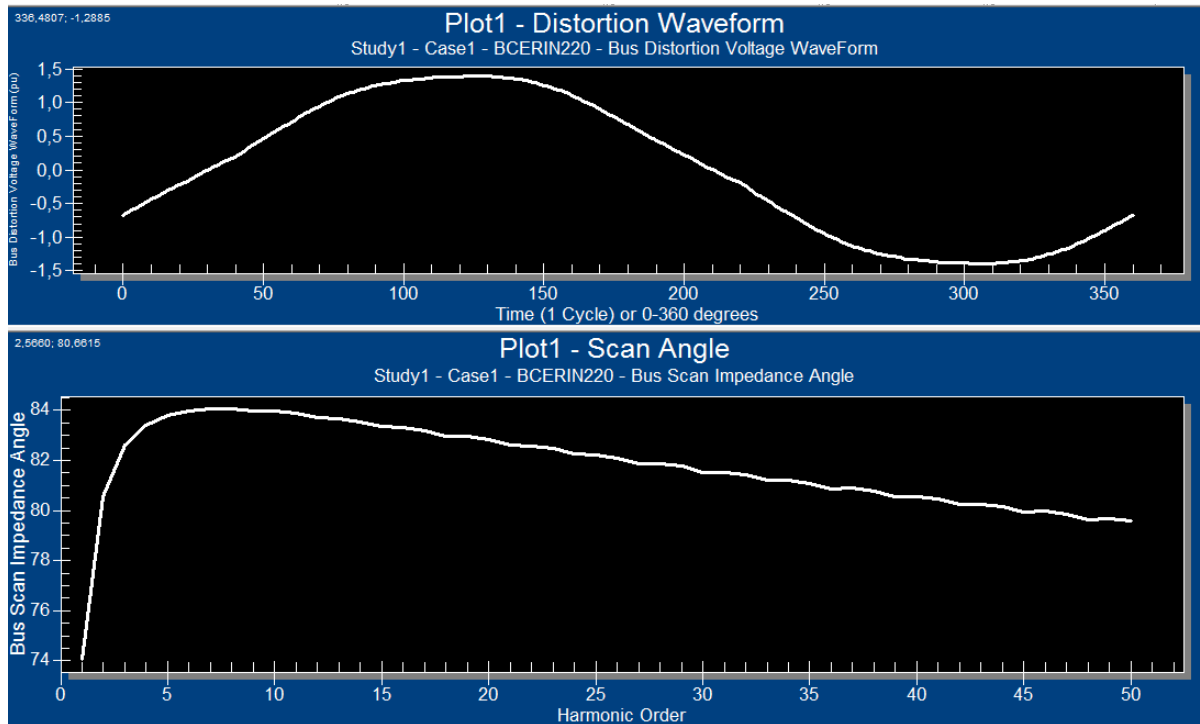


Figura B.8 - Fase da impedância harmônica.

A Figura B.9 mostra o diagrama unifilar para o cenário 3 representando o caso de instalação de 45 kW do CERIn.

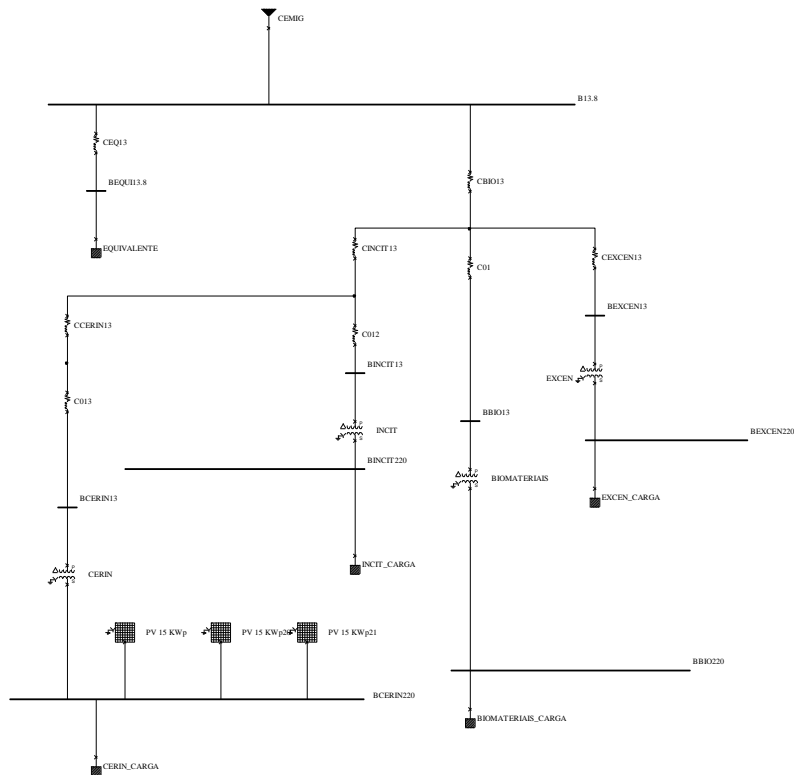


Figura B.9 – Cenário 3 – 45kWp no CERIn

Já nas Figuras B.10 – B.12 exemplificam um arquivo de saída através da simulação no que diz respeito às formas de onda de tensão, o espectro da forma de onda, impedância em módulo e ângulo vista pela barra do CERIn.

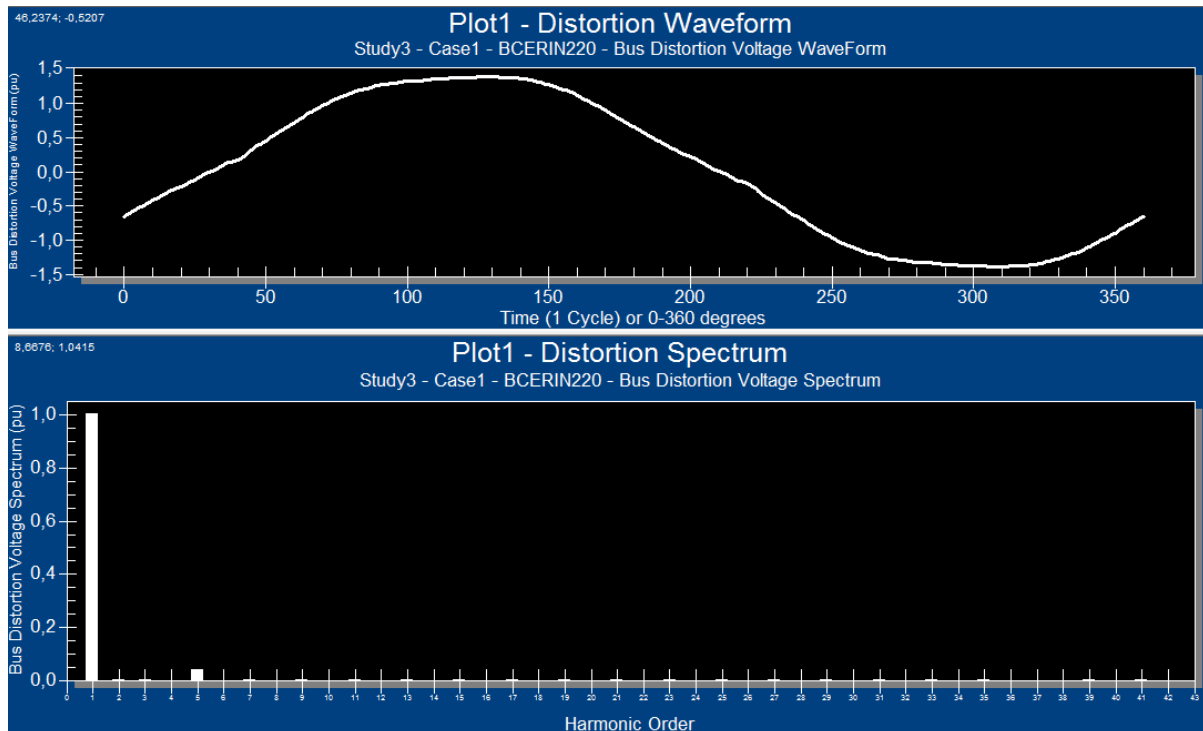


Figura B.10 - Espectro de tensão.

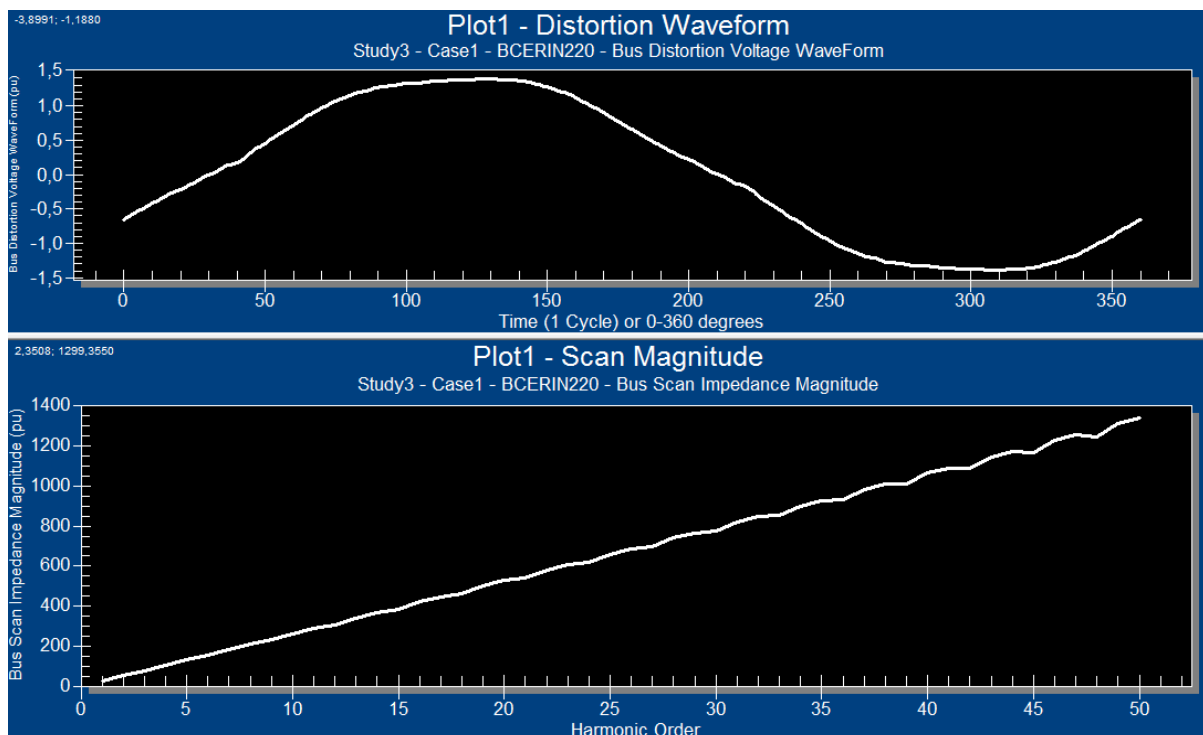


Figura B.11 Módulo da impedância harmônica.

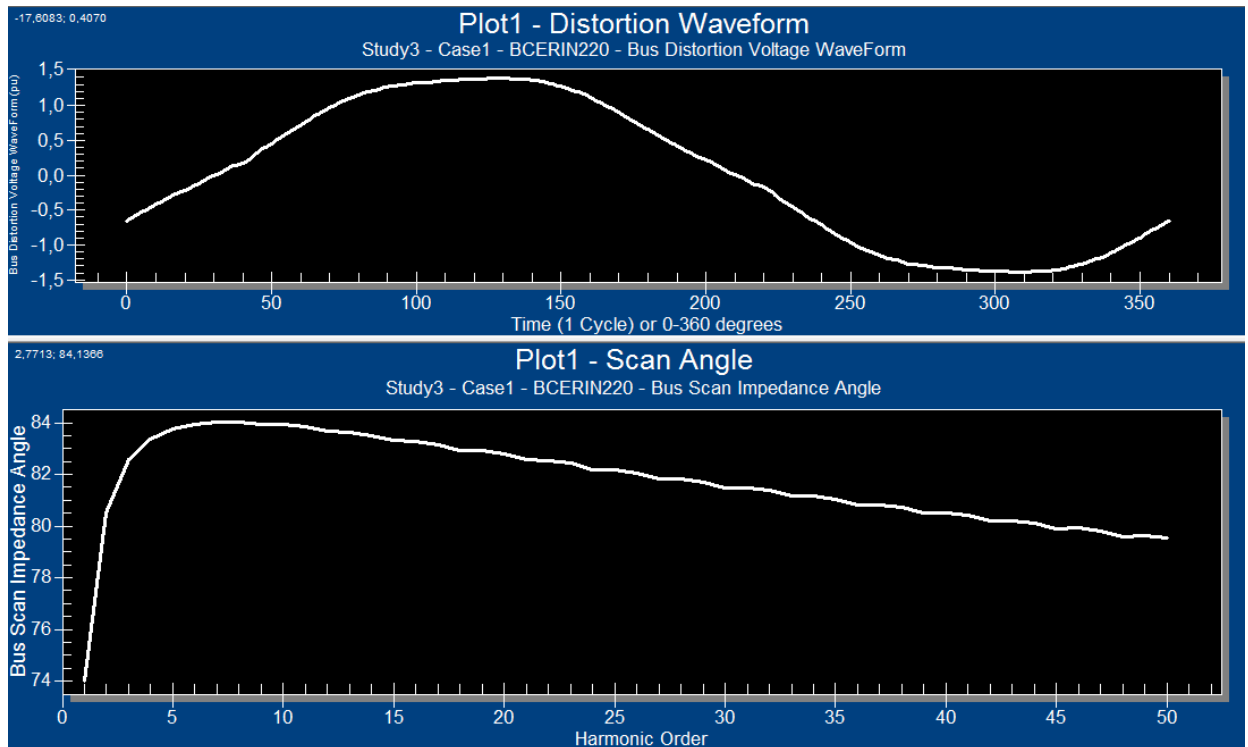


Figura B.12 - Fase da impedância harmônica.

A Figura B.12 mostra o diagrama unifilar para o cenário 4 representando o caso de instalação de 180 kW na UNIFEI.

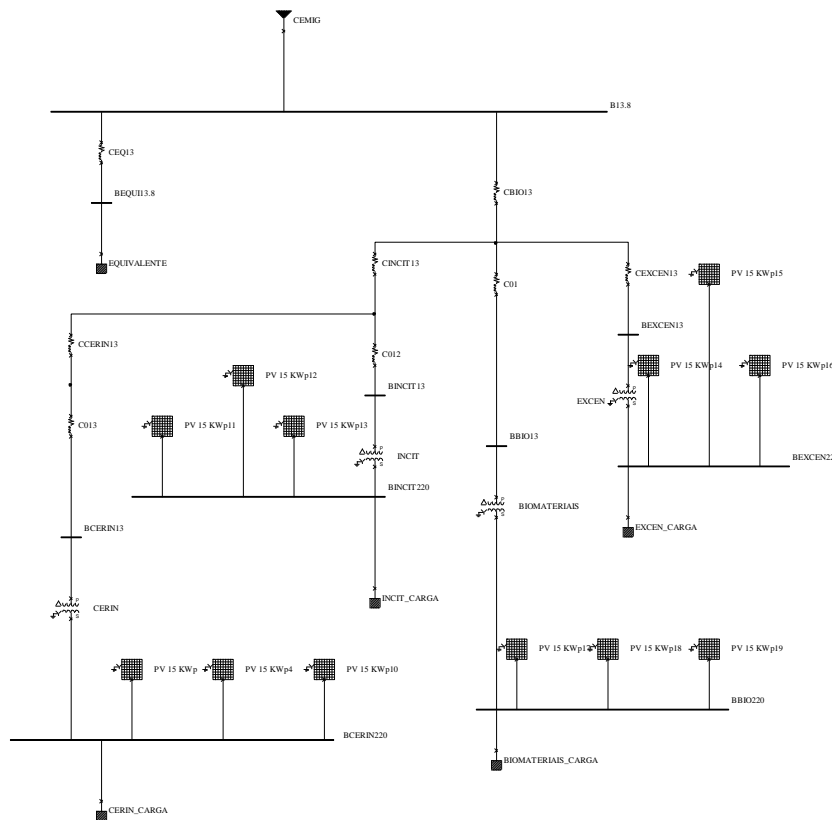


Figura B.13 – Cenário 4 – 180 kWp na UNIFEI.

Já nas Figuras B.14 – B.16 exemplificam um arquivo de saída através da simulação no que diz respeito às formas de onda de tensão, o espectro da forma de onda, impedância em módulo e ângulo vista pela barra de 13,8 kV.

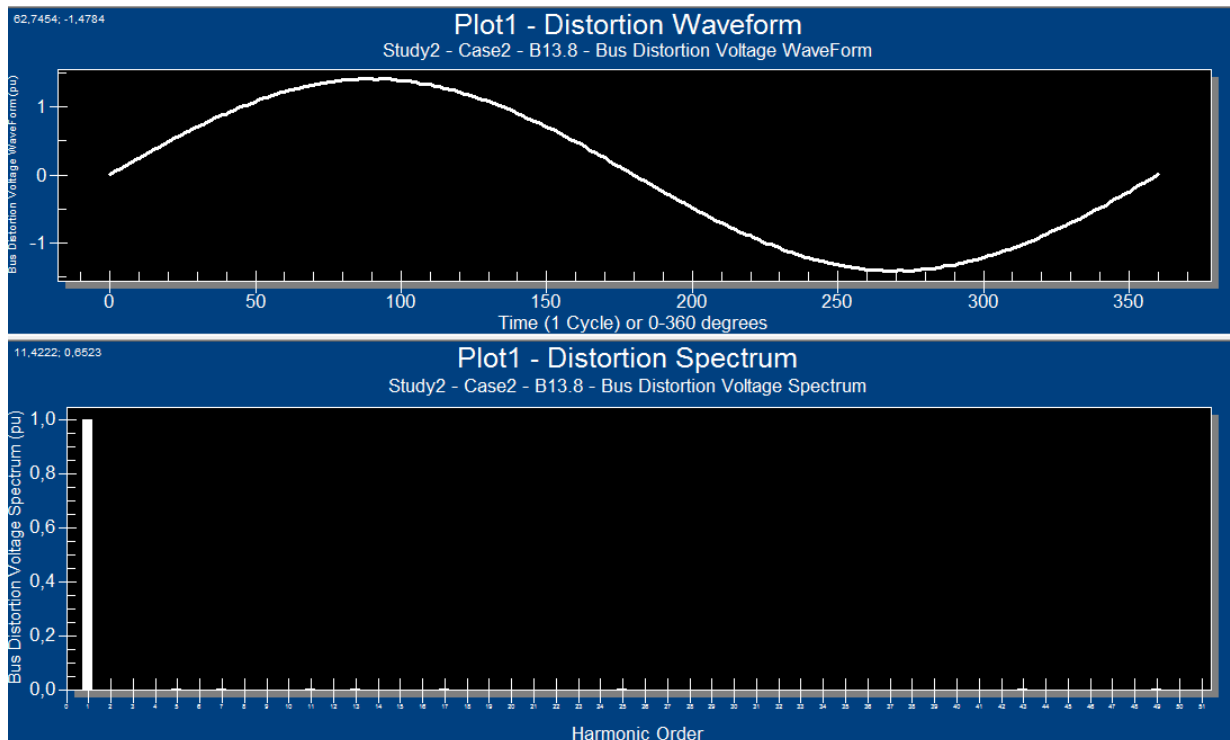


Figura B.14 - Espectro de tensão.

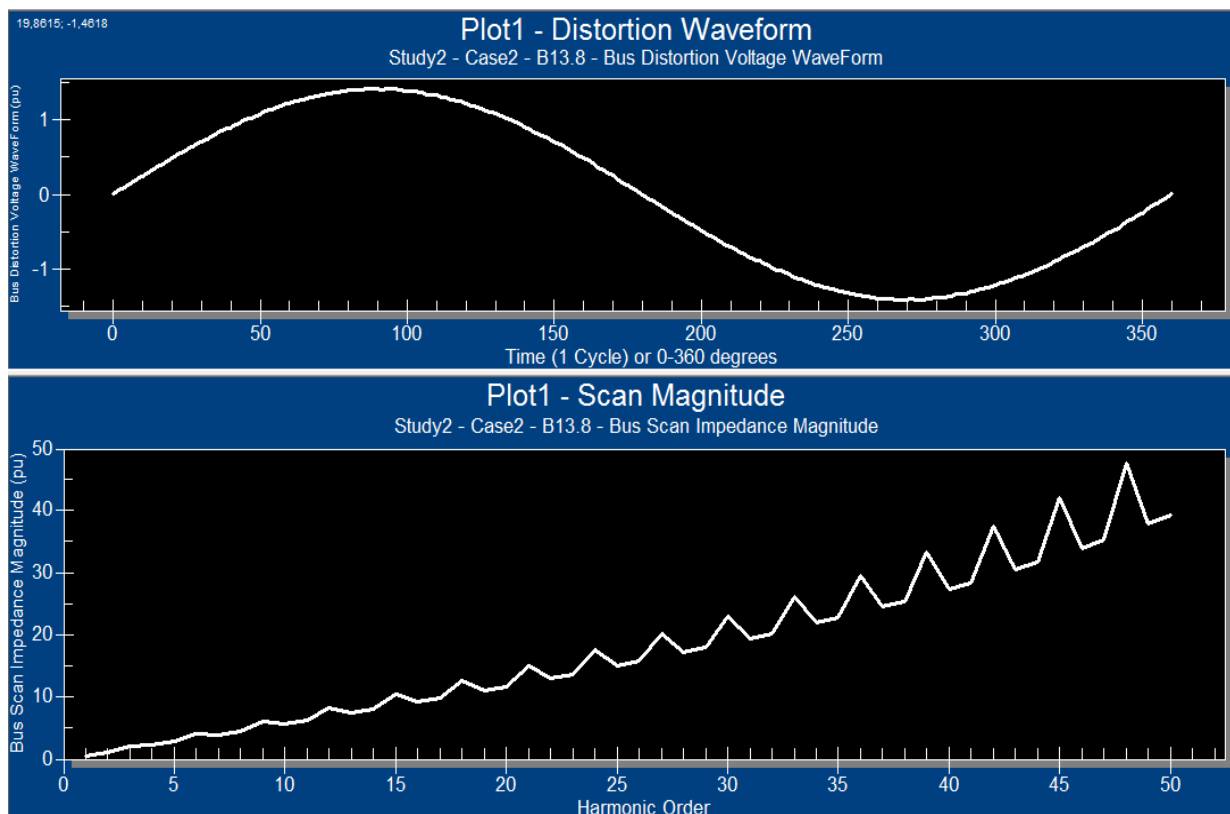


Figura B.15 - Módulo da impedância harmônica

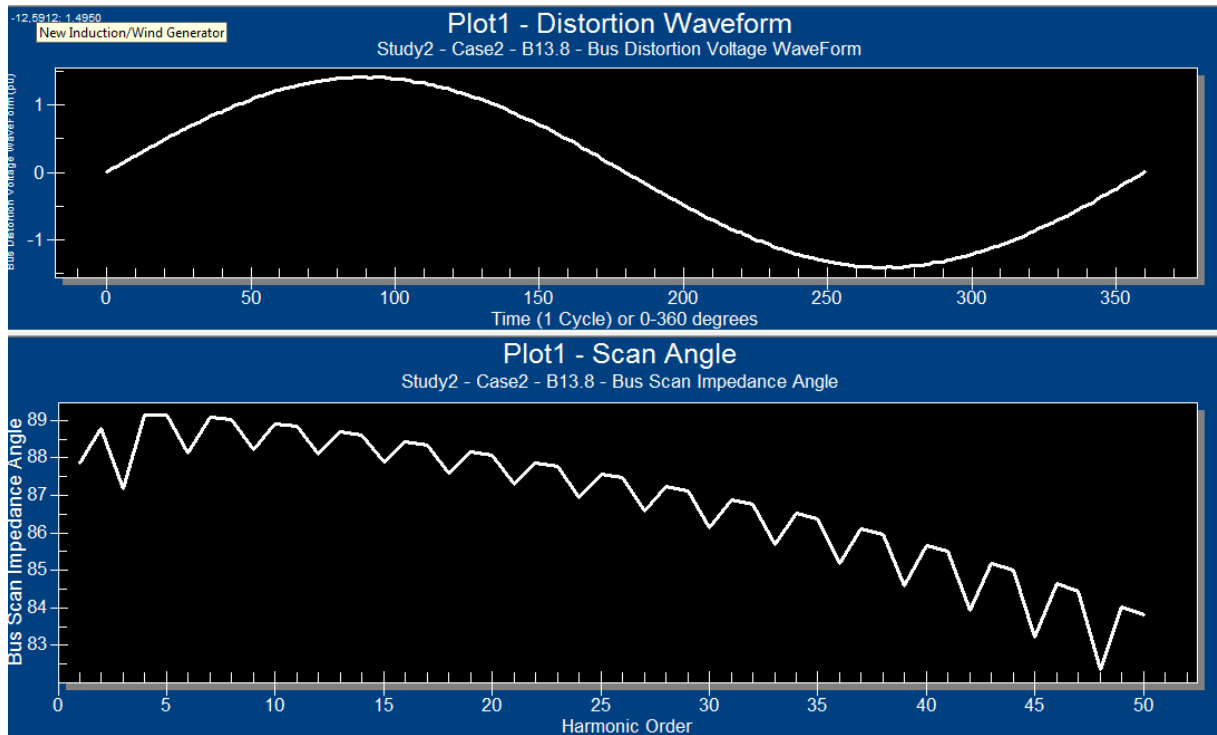


Figura B.16 - Fase da impedância harmônica.

ANEXO C – Especificação dos Medidores

Especificações para o <i>PowerGuide 4400</i>:
<ul style="list-style-type: none"> Parâmetros medidos: <p>(4) entradas diferenciais, 1-600V rms, AC / DC, 0,1% de leitura 0,05% FS, 256 amostras / ciclo, ADC 16bit (4) entradas com TCs 0.1-3000A rms, AC / DC, 256S / c, 0,1% de leitura + CTs, ADC 16 bit Faixa de frequência, resolução 10mHz, 45-65 Hz</p>
<ul style="list-style-type: none"> Monitoramento: <p>IEEE 1159 IEC 61000-4-30 EN50160 Corrente de partida / Energização Gravação de falha de tensão Qualidade de Abastecimento (EN50160 ou indicador) Monitoramento de longo prazo Dados Contínuos de Registro w / min / max / avg</p>
<ul style="list-style-type: none"> Triggers de Qualidade de Energia:
Especificações para o <i>PowerGuide 4400</i>:
<p>Análise de ciclo a ciclo 256 amostras / ciclo; 1/2 ciclo passos RMS F-F, F-N, N-G RMS Variações: Afundamentos / elevações / interrupções) RMS Gravações V & I (X / X / X ciclos) Gravações de forma de onda (2/6/2 ciclos) Baixos e médios Transitórios frequentes - V & I Resumo de Parâmetros Harmônicos Cruz trigger V & canais I Caracterização de evento RMS (IEEE ou IEC)</p>
<ul style="list-style-type: none"> Distorção / Potência / Energia: <p>W, VA, VAR, TPF, DPF, demanda de energia, Harmônicos / inter-harmônico por IEC 1000/04/07 THD / Espectro Harmônica(V, I, W) para 63 TID / Espectro Inter-harmônico (V, I) de 63 Cintilação IEC 1000/04/15 (Pst, Plt, Sliding Plt) CF, KF, TDF, TIF Desequilíbrios</p>

Figura C.1 - Especificação *PowerGuide 4400*

Especificações para o Xplorer Power PX5
<ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros medidos: <p>(4) entradas diferenciais, 1-600 Vrms, AC / DC, 0,1% da leitura + 0,05% FS, 256 amostras / ciclo, ADC de 16 bits</p> <p>(4) entradas com CTS 0,1-6000 Armas CT-dependente, AC / DC, 0,1% de leitura + CTS, 256 amostras / ciclo, a ADC de 16 bits</p> <p>1 MHz de alta velocidade de amostragem de 14 bits ADC, 1% FS</p> <p>Faixa de frequência, resolução 10m Hz, 15-20, Hz ,45-65 Hz, ou 350-450 Hz</p> <p>Circuito fase de bloqueio - Gerador de rastreamento</p> <p>Loop de Fase de bloqueio - modo Padrão PQ</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento: <p>IEEE 1159</p> <p>IEC 61000-4-30 Classe A</p> <p>EN50160 qualidade do fornecimento</p> <p>Corrente de partida / Energização</p> <p>Gravação de falha de tensão</p> <p>Monitoramento de longo prazo</p>
Especificações para o Xplorer Power PX5
Dados Contínuos de Registro w / min / max / avg
<ul style="list-style-type: none"> • Triggers de Qualidade de Energia: <p>Análise de ciclo a ciclo</p> <p>256 amostras / ciclo; 1/2 passos ciclo RMS</p> <p>F-F, F-N, N-G RMS Variações: Afundamentos / elevações / interrupções)</p> <p>Gravações RMS V & I (32 pré-falta, 10K pós-falta ciclos)</p> <p>Gravações forma de onda (2/6/2 ciclos)</p> <p>Baixos e médios Transitórios frequentes - V & I</p> <p>Transientes de alta frequência - V & I, 3% FS trigger</p> <p>Resumo de Parâmetros Harmônicos</p> <p>Cruz trigger V & canais I</p> <p>Caracterização de evento RMS(IEEE ou IEC)</p> <p>Caracterização de eventos transitórios</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Distorção / Potência / Energia: <p>W, VA, VAR, TPF, DPF, Demanda de Energia, etc</p> <p>IEEE 1459 Parâmetros de distorção e desequilíbrio</p> <p>Harmônicos / inter-harmônico por IEC 1000/04/07</p> <p>THD / Espectro Harmônico (V, I, W) para 63</p> <p>TID / Espectro Inter-harmônico (V, I) de 63</p> <p>Cintilação IEC 1000/04/15 (Pst, Plt, Sliding Plt)</p> <p>Fator de Crista, Fator K, Transformador de fator de redução, fator de interferência de telefone</p> <p>Desequilíbrio (máx. desvio rms) e sequenciamento de componentes</p> <p>5 usuários de Especificações Harmônicas ou Frequência de Sinalização</p>

Figura C.2 - Especificação PowerGuidePX5

ANEXO D – Especificação do Painél Fotovoltaico

YGE 60 CELL SERIES

- YL260P-29b
- YL255P-29b
- YL250P-29b
- YL245P-29b
- YL240P-29b

16.0%
MAXIMUM EFFICIENCY

25 YEAR
LINEAR POWER WARRANTY

0-3%
POWER TOLERANCE

YINGLISOLAR.COM



U.S. Soccer Powered by Yingli Solar

PROVEN PERFORMANCE AND VERSATILITY

Our most popular product line, the YGE 60 Cell Series, is ideal for a broad range of applications. It is proven to perform in tens of thousands of projects across the Americas, from residential and commercial rooftops to ground-mounted solar farms.



Trusted Partner

Yingli is the world's largest solar module manufacturer with over 10 GW deployed worldwide, and Yingli modules are trusted by leading energy providers and financial institutions in more than 85,000 projects in the Americas. As the first renewable energy sponsor of U.S. Soccer and 2014 FIFA World Cup™, our brand is highly recognizable.



More Energy per Watt

Yingli modules deliver superior power output in a variety of temperature and irradiance conditions, and self-cleaning anti-reflective coated glass reduces soiling to help maximize power output. Performance is backed by our 25-year linear warranty.



Designed to Outlast

Tested to the industry's most rigorous durability standards, Yingli modules are PID-resistant in conformance with IEC 62804 (draft). To ensure reliable performance, Yingli uses quality components such as DuPont™ Tedlar® PVF film-based backsheets.



Best-In-Class Technical Support

Yingli's locally-based engineering team is trained in system design and operations to provide field-support and value-added after sales services, including commissioning and field-testing support. Our PV Testing Lab in California provides a resource for evaluating technical inquiries.

Warranty Information

Ten-year limited product warranty. Industry leading 25-year performance warranty adds value by guaranteeing power output on an annual basis, in compliance with our warranty terms and conditions.

Performance Modeling

For those interested in obtaining module performance modeling files for system energy yield simulation, please contact Yingli at simulation@yingliamericas.com.

Qualifications & Certificates

UL 1703 and UL 1703, CEC, FSEC, ISO 9001:2008, ISO 14001:2004, BS OHSAS 18001:2007, SA8000



YGE 60 CELL SERIES

Powered by **YINGLI**

ELECTRICAL PERFORMANCE

Electrical parameters at Standard Test Conditions (STC)

Module type			YL260P-29b	YL255P-29b	YL250P-29b	YL245P-29b	YL240P-29b
Power output	P_{max}	W	260	255	250	245	240
Power output tolerances	ΔP_{max}	%	-0 / +3				
Module efficiency	η_m	%	16.0	15.7	15.4	15.1	14.8
Voltage at P_{max}	V_{mpp}	V	30.3	30.0	29.8	29.6	29.3
Current at P_{max}	I_{mpp}	A	8.59	8.49	8.39	8.28	8.18
Open-circuit voltage	V_{oc}	V	37.7	37.7	37.6	37.5	37.5
Short-circuit current	I_{sc}	A	9.09	9.01	8.92	8.83	8.75

STC: 1000W/m² irradiance, 25°C cell temperature, AM 1.5G spectrum according to EN 60904-3

Maximum power output P_{max} at multiple rating conditions of temperature and irradiance

		Temperature	Irradiance	YL260P-29b	YL255P-29b	YL250P-29b	YL245P-29b	YL240P-29b
		°C	W/m ²	W	W	W	W	W
High Temperature Condition	HTC	75	1000	203.7	199.8	195.9	192.0	188.1
Nominal Operating Cell Temperature	NOCT	46	800	190.6	186.9	183.2	179.5	175.9
Low Temperature Condition	LTC	15	500	135.7	133.1	130.5	127.9	125.3
Low Irradiance Condition	LIC	25	200	50.3	49.4	48.4	47.4	46.5

OPERATING CONDITIONS

Max. system voltage	1000Voc
Max. series fuse rating	15A
Limiting reverse current	15A
Operating temperature range	-40 to 185°F (-40 to 85°C)
Max. hailstone impact (diameter / velocity)	25mm / 23m/s

THERMAL CHARACTERISTICS

Temperature coefficient of P_{max}	%/°C	-0.43
Temperature coefficient of V_{oc}	%/°C	-0.32
Temperature coefficient of I_{sc}	%/°C	0.04
Temperature coefficient of V_{mpp}	%/°C	-0.42

Units: inch (mm)

CONSTRUCTION MATERIALS

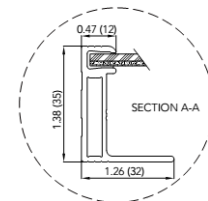
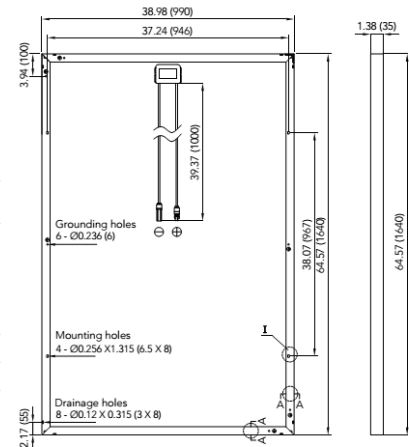
Front cover (material / thickness)	low-iron tempered glass / 3.2mm
Cell (quantity / material / dimensions)	60 / multicrystalline silicon / 156mm x 156mm
Encapsulant (material)	ethylene vinyl acetate (EVA)
Backsheet (material / color)	fluoropolymer-based with EVA primer / white or black
Frame (material / color)	anodized aluminum / silver or black
Junction box (ingress protection rating)	≥ IP65
Cable (length / cross-sectional area)	1000mm / 4mm ²
Connector (type / ingress protection rating)	MC4 / IP67 or Amphenol H4 / IP68

GENERAL CHARACTERISTICS

Module dimensions (L / W / H)	64.57in (1640mm) / 38.98in (990mm) / 1.38in (35mm)
Module weight	40.8lbs (18.5kg)
Number of modules per pallet	29
Number of pallets per 40' container	28
Packaging box dimensions (L / W / H)	67in (1700mm) / 45in (1135mm) / 46in (1165mm)
Packaging box weight	1252lbs (568kg)



Warning: Read the Installation and User Manual in its entirety before handling, installing, and operating Yingli modules.



Yingli Green Energy Americas, Inc.
 info@yingliamericas.com
 Tel: +1 (888) 686-8820

YINGLISOLAR.COM | NYSE:YGE

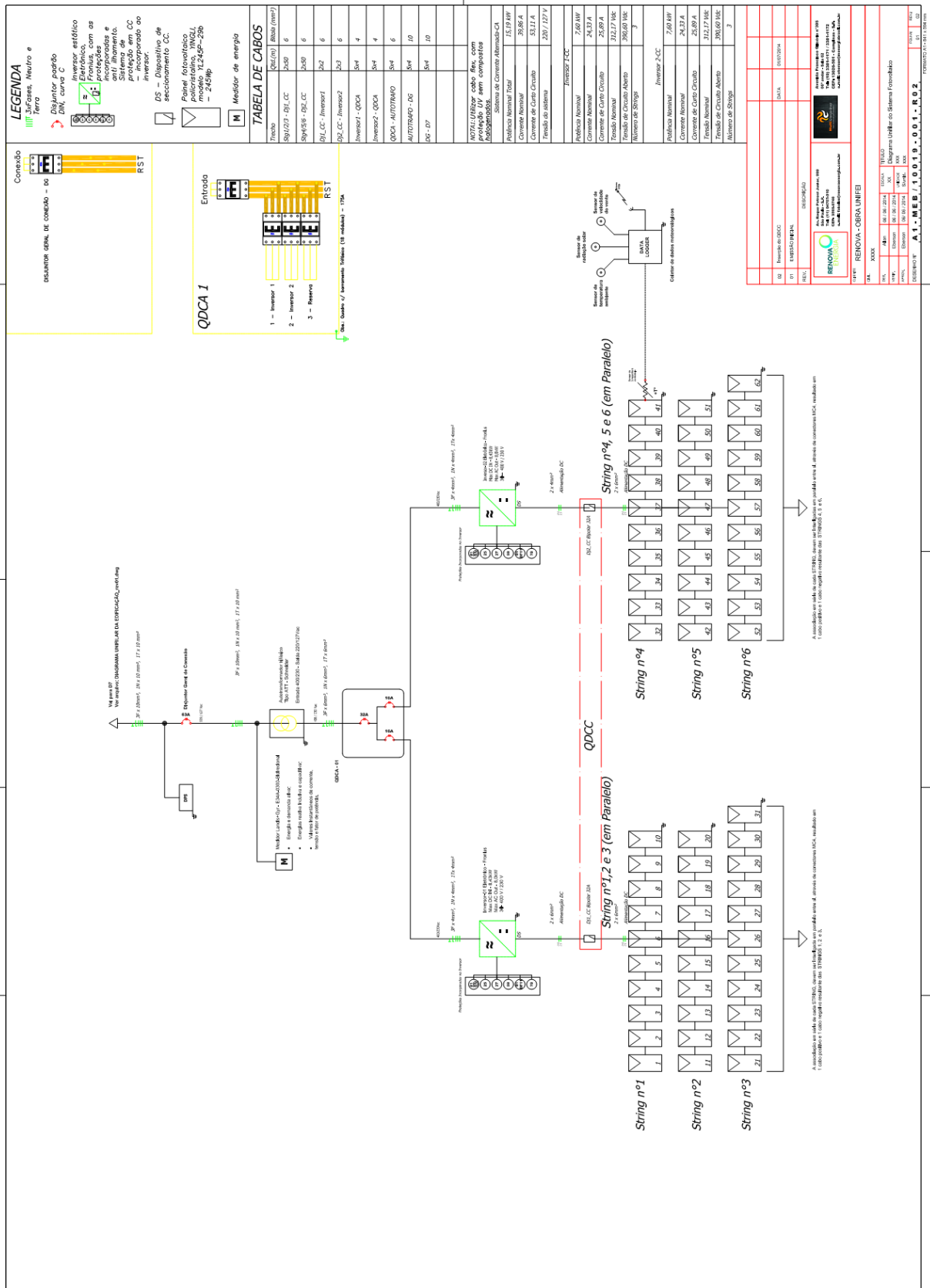
© Yingli Green Energy Holding Co. Ltd. | YGE60CellSeries2014_EN_201410_V02

DuPont™ and Teflon® are registered trademarks of E.I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates. The specifications in this datasheet are not guaranteed and are subject to change without prior notice.



U.S. Soccer Powered by Yingli Solar

ANEXO E – Diagrama Unifilar PV CERIn



RENNOVA - OBRA UNIFEI

00 - INSCRIÇÃO DE OBRA

01 - INSCRIÇÃO DE OBRA

02 - INSCRIÇÃO DE OBRA

03 - INSCRIÇÃO DE OBRA

04 - INSCRIÇÃO DE OBRA

05 - INSCRIÇÃO DE OBRA

06 - INSCRIÇÃO DE OBRA

07 - INSCRIÇÃO DE OBRA

08 - INSCRIÇÃO DE OBRA

09 - INSCRIÇÃO DE OBRA

10 - INSCRIÇÃO DE OBRA

11 - INSCRIÇÃO DE OBRA

12 - INSCRIÇÃO DE OBRA

13 - INSCRIÇÃO DE OBRA

14 - INSCRIÇÃO DE OBRA

15 - INSCRIÇÃO DE OBRA

16 - INSCRIÇÃO DE OBRA

17 - INSCRIÇÃO DE OBRA

18 - INSCRIÇÃO DE OBRA

19 - INSCRIÇÃO DE OBRA

20 - INSCRIÇÃO DE OBRA

21 - INSCRIÇÃO DE OBRA

22 - INSCRIÇÃO DE OBRA

23 - INSCRIÇÃO DE OBRA

24 - INSCRIÇÃO DE OBRA

25 - INSCRIÇÃO DE OBRA

26 - INSCRIÇÃO DE OBRA

27 - INSCRIÇÃO DE OBRA

28 - INSCRIÇÃO DE OBRA

29 - INSCRIÇÃO DE OBRA

30 - INSCRIÇÃO DE OBRA

31 - INSCRIÇÃO DE OBRA

32 - INSCRIÇÃO DE OBRA

33 - INSCRIÇÃO DE OBRA

34 - INSCRIÇÃO DE OBRA

35 - INSCRIÇÃO DE OBRA

36 - INSCRIÇÃO DE OBRA

37 - INSCRIÇÃO DE OBRA

38 - INSCRIÇÃO DE OBRA

39 - INSCRIÇÃO DE OBRA

40 - INSCRIÇÃO DE OBRA

41 - INSCRIÇÃO DE OBRA

42 - INSCRIÇÃO DE OBRA

43 - INSCRIÇÃO DE OBRA

44 - INSCRIÇÃO DE OBRA

45 - INSCRIÇÃO DE OBRA

46 - INSCRIÇÃO DE OBRA

47 - INSCRIÇÃO DE OBRA

48 - INSCRIÇÃO DE OBRA

49 - INSCRIÇÃO DE OBRA

50 - INSCRIÇÃO DE OBRA

51 - INSCRIÇÃO DE OBRA

52 - INSCRIÇÃO DE OBRA

53 - INSCRIÇÃO DE OBRA

54 - INSCRIÇÃO DE OBRA

55 - INSCRIÇÃO DE OBRA

56 - INSCRIÇÃO DE OBRA

57 - INSCRIÇÃO DE OBRA

58 - INSCRIÇÃO DE OBRA

59 - INSCRIÇÃO DE OBRA

60 - INSCRIÇÃO DE OBRA

61 - INSCRIÇÃO DE OBRA

62 - INSCRIÇÃO DE OBRA

63 - INSCRIÇÃO DE OBRA

64 - INSCRIÇÃO DE OBRA

65 - INSCRIÇÃO DE OBRA

66 - INSCRIÇÃO DE OBRA

67 - INSCRIÇÃO DE OBRA

68 - INSCRIÇÃO DE OBRA

69 - INSCRIÇÃO DE OBRA

70 - INSCRIÇÃO DE OBRA

71 - INSCRIÇÃO DE OBRA

72 - INSCRIÇÃO DE OBRA

73 - INSCRIÇÃO DE OBRA

74 - INSCRIÇÃO DE OBRA

75 - INSCRIÇÃO DE OBRA

76 - INSCRIÇÃO DE OBRA

77 - INSCRIÇÃO DE OBRA

78 - INSCRIÇÃO DE OBRA

79 - INSCRIÇÃO DE OBRA

80 - INSCRIÇÃO DE OBRA

81 - INSCRIÇÃO DE OBRA

82 - INSCRIÇÃO DE OBRA

83 - INSCRIÇÃO DE OBRA

84 - INSCRIÇÃO DE OBRA

85 - INSCRIÇÃO DE OBRA

86 - INSCRIÇÃO DE OBRA

87 - INSCRIÇÃO DE OBRA

88 - INSCRIÇÃO DE OBRA

89 - INSCRIÇÃO DE OBRA

90 - INSCRIÇÃO DE OBRA

91 - INSCRIÇÃO DE OBRA

92 - INSCRIÇÃO DE OBRA

93 - INSCRIÇÃO DE OBRA

94 - INSCRIÇÃO DE OBRA

95 - INSCRIÇÃO DE OBRA

96 - INSCRIÇÃO DE OBRA

97 - INSCRIÇÃO DE OBRA

98 - INSCRIÇÃO DE OBRA

99 - INSCRIÇÃO DE OBRA

100 - INSCRIÇÃO DE OBRA