

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MODELAGEM DE CARGAS NÃO LINEARES E REDE DE ENERGIA ELÉTRICA
PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

por

Ricardo Augusto Pufal

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2012

MODELAGEM DE CARGAS NÃO LINEARES E REDE DE ENERGIA ELÉTRICA
PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

por

Ricardo Augusto Pufal
Engenheiro Eletricista

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica - Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. João Carlos Verneti dos Santos - ULBRA

Prof. Dr. Felipe Hernández García – DELET/UFRGS

Prof. Dr^a. Adriane Prisco Petry – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 05 de junho de 2012

Dedico este trabalho a minha esposa Marilene, e a minhas filhas Milene e Nathália que muito me auxiliaram nesta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Arno Krenzinger pelo auxílio e orientação.

Aos colegas do LABSOL em especial ao Dr. Cesar Prieb, entre outros, pela colaboração.

Aos colegas do PROMEC/DEMEC Julien de Melo, Melina Dick, e Maria de Lourdes dos Santos pelo apoio.

Ao programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Prof. Dr. Yeddo Blauth pelas pertinentes informações a respeito da temática do atual trabalho.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a elaboração desta dissertação.

RESUMO

Os inversores utilizados no sistema fotovoltaico conectados à rede (SFCR) devem apresentar uma forma de onda senoidal nos seus terminais de saída. Monitoram regularmente a qualidade de energia da rede elétrica aos quais estão conectados, de maneira a só gerarem energia se a rede estiver com tensão. Dependendo do inversor, da potência que ele está desenvolvendo em relação à sua potência nominal, da rede ao qual está conectado e das características da carga que ele alimentará, podem ser apresentadas distorções na rede de energia em relação à forma de onda senoidal pura, tanto a nível de tensão como a nível de corrente elétrica. Não é incomum os dispositivos que são conectados a redes apresentarem-se como geradores de harmônicos, principalmente os eletrônicos. Estas distorções, conhecidas na literatura como distorções harmônicas, afetam o desempenho dos inversores quando ligados a redes elétricas. Nestas redes, como pode haver distorções significativas. Os parâmetros elétricos que os inversores se baseiam para obter as características da rede a qual estão conectados, devido a estas distorções, podem fazer com que os mesmos se desconectem. O inversor também se desconectará automaticamente da rede ao perceber a ocorrência de variação acentuada da rede ou a falta dela; a esse sistema, dá-se a denominação anti-ilhamento. Portanto, é de bastante importância que se consiga reproduzir teoricamente o comportamento das cargas e das redes elétricas, nas quais os inversores serão conectados para que seja possível estudá-los quando interligados às diferentes cargas. Entretanto, devido ao inversor ser também um equipamento eletrônico baseado em fonte chaveada para “remontar” a onda senoidal, o mesmo também acaba introduzindo uma deformação tanto na tensão como na corrente da rede elétrica ao qual está conectado, e esta deformação é também significativa em SFCR de grande porte (instalação de geração fotovoltaica com grande número de inversores). Assim, este trabalho visa implementar a modelagem de cargas não lineares (degradadoras da qualidade de energia) para serem aplicadas em simulações de inversores de SFCR, com aplicação especial no parâmetro “cargas” do programa para computadores FVCONNECT desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

ABSTRACT

It is known that the inverters used in photovoltaic systems connected to mains power (SFCR), when connected to the power grid, should provide a sinusoidal waveform at its output terminals. The photovoltaic systems inverters regularly monitor the power grid quality they are connected to, so they generate power only if the grid of the Concessionaire or external power grid presents voltage. Depending on the inverter, on the power that it develops over the same rated power, on the power grid it is connected to and on the characteristics of the load that it also feeds, it is possible to occur certain distortions on the power grid compared to pure sine waveform, in terms of voltage or even in terms of electric current. The devices connected to grid commonly present themselves as harmonic generators. The loads cause large distortions in the power grid causing disorders occur both voltage and current in a distribution line or power circuit. These distortions, commented in the literature as harmonic distortions, greatly affect the inverters performance when connected to power grids. On these grids, as it is possible to identify significant distortions, the parameters for pairing the power grid, in which the inverters are based, can turn them into disconnection. The inverter automatically disconnects from the grid if for some reason the grid stops powering the power grid - such system is called anti-islanding. Therefore, it is important to theoretically reproduce the behavior of power grids which the inverters are connected to, in order to study them. However, due to the fact that the inverter is also a switched source-based electronic equipment to "reassemble" the sine wave, it provides a deformation not only on the voltage but also on the power grid current which it is connected to, being this deformation also significant in large SFCR (photovoltaic generation facility with large numbers of inverters). In this sense, the present work aims to implement the modeling of nonlinear loads (which can degrade the power quality) in SFCR inverters simulations, based on the special application of loads parameters from the FVCONNECT software, developed by the Solar Energy Laboratory, Federal University of Rio Grande do Sul.

Keywords: Grid-connected photovoltaic systems, inverters, simulation program for photovoltaic systems, power quality.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivo da dissertação	5
1.2	Escopo da dissertação	5
2	REVISÃO DE CONTEÚDOS	6
2.1	Harmônicas	6
2.1.1	Conceituação física das componentes harmônicas	6
2.1.2	Conceituação das componentes harmônicas em rede elétrica de 60 Hz – corrente alternada	7
2.1.3	O surgimento das componentes harmônicas	7
2.1.4	Quantificação das amplitudes das componentes harmônicas.....	8
2.1.5	Componentes harmônicas no sistema elétrico trifásico	8
2.1.5.1	Seqüência positiva (direta), negativa (inversa) e zero (em fase) das componentes harmônicas.....	9
2.1.5.2	O efeito do desequilíbrio de tensão na geração harmônica	11
2.1.6	Sentido do fluxo de potência harmônico – geração/consumo.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1	Inversores e tipos de sincronização dos mesmos com a rede.....	14
3.2	Limites de operação de sistemas conectados à rede e normas técnicas de conexão ..	16
3.3	Aspectos da geração de harmônicos em sistema FV de acordo com insolação	18
3.4	Modelagem dos circuitos: inversores e redes elétricas	19
4	MODELAGEM PROPOSTA E RESULTADOS ALCANÇADOS.....	36
4.1	Descrição da modelagem usualmente utilizada.....	36
4.2	Descrição da modelagem proposta.....	37
4.3	Modelagem do conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes	38
4.3.1	Equacionamento matemático para a carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes.....	40

4.3.2	Simulação computacional do modelo: carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes.....	41
4.4	Modelagem do microcomputador	44
4.4.1	Equacionamento matemático para a carga não linear microcomputador	45
4.4.2	Simulação computacional do modelo: carga não linear microcomputador	46
4.5	Aplicabilidade da modelagem para dez microcomputadores ligados à rede.....	48
4.6	Formas de onda de medições realizadas em um inversor Fronius IG30 conectado à rede em três situações de potência gerada.....	50
4.7	Simulação na rede elétrica do modelo proposto com a inserção do inversor Fronius IG30.....	56
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	61
5.1	Conclusões.....	61
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	(a) Inversor fonte de corrente (CSI) e (b) inversor fonte de tensão (VSI).....	2
Figura 1.2	Sistema fotovoltaico instalado em uma residência conectado à rede. (1) gerador fotovoltaico, (2) caixa de conexões CC, (3) cabeamento, (4) disjuntores de proteção, (5) inversor, (6) cabeamento CA e (7) quadros de medição, distribuição e disjuntor CA [DGS,2008].....	4
Figura 2.1	Forma de Onda Hipotética $Y(t)$	7
Figura 2.2	(a) Onda Senoidal Pura e (b) Deformação na forma de onda senoidal causada pelo conteúdo harmônico.....	8
Figura 2.3	Sistema trifásico equilibrado na distribuição de corrente com distorção da mesma junto à carga	9
Figura 2.4	Circuito Equivalente mostrando fonte de tensão ideal com impedância da linha (Z_L) e as cargas linear (Z_1) e carga não linear (Z_2).....	12
Figura 2.5	Circuito mostrando o equivalente Thevenin resultante da carga linear e da linha (Z_T) e a carga não linear (Z_2).....	12
Figura 3.1	Modelo do inversor de um sistema FV para conexão com a rede elétrica pública	15
Figura 3.2	Dispersão de THDi de tensão e corrente para condições de geração diferentes [Fekete et al., 2012].....	18
Figura 3.3	Variação diária de um sistema geração de potência de um FV e THDi para um dia médio de inverno na Croácia de acordo com Fekete et al., 2012	19
Figura 3.4	Proposta de Balathandayuthapani et al., 2011, para modelar um SFCR com rede e carga lineares	20
Figura 3.5	Proposta de Bialasiewicz, 2008, para análise do sistema	22
Figura 3.6	Proposta de Dash e Kazerani, 2011, para o sistema SFCR ser simulado	22
Figura 3.7	Proposta de Chen et al., 2008, para simulação do sistema a ser simulado	23
Figura 3.8	Proposta de Edrington et al., 2010, para um sistema com múltiplos painéis fotovoltaicos, com sistema de armazenamento e conexão com a rede elétrica através de duas linhas de transmissão.....	24

Figura 3.9	Sistema proposto por Hamadi et al., 2011, no qual mostra cargas não lineares monofásicas e trifásicas conectadas à rede elétrica junto com cargas monofásicas	25
Figura 3.10	Tensões e correntes de estado estacionário do sistema representado anteriormente, em desequilíbrio de carga sem o sistema fotovoltaico, segundo simulação [Hamadi et al., 2011]	26
Figura 3.11	Resposta dinâmica do sistema representado anteriormente, durante variação súbita de carga desequilibrada sem o sistema fotovoltaico [Hamadi et al., 2011]	27
Figura 3.12	Resposta dinâmica do sistema com desequilíbrio de carga e sistema fotovoltaico sob diferentes variações de irradiação [Hamadi et al., 2011]	27
Figura 3.13	Análise do fluxo de potência do sistema com diferentes irradiâncias do sistema fotovoltaico com carga desequilibrada [Hamadi et al., 2011]	28
Figura 3.14	Diagrama unifilar do sistema proposto por Wu e Tao, 2009, conectado a um sistema de distribuição de energia	28
Figura 3.15	Sistema proposto por Papaioannou et al., 2011, mostrando um sistema FV conectado a um sistema de distribuição de energia	29
Figura 3.16	Corrente fundamental e harmônicas de ordem superior 3 ^a , 5 ^a , 7 ^a , 9 ^a e 11 ^a medidos em uma linha em um dia com o sistema FV ligado à rede [Papaioannou et al., 2011]	30
Figura 3.17	Modelo utilizado para simular, por Papaioannou et al., 2011, a validação dos resultados de acordo com as medidas realizadas	31
Figura 3.18	Modelo utilizado por Viet e Yokoyama, 2010, a mostrando o sistema FV conectado à rede	31
Figura 3.19	Registro gráfico que demonstra na parte superior a distorção harmônica gerada e injetada na rede por um sistema fotovoltaico de 5kW em comparação com a potência produzida pelo mesmo sistema durante um determinado dia de operação [Chicco et al., 2009]	32
Figura 3.20	Valores relativos a 95% do conteúdo harmônico de corrente de um inversor CA de 5kW para diferentes condições de carga medidos durante 4 dias (3 ^a harmônica truncada) [Chicco et al., 2009]	33
Figura 3.21	Diagrama de blocos do sistema de trifásico conectado a rede proposto por Rey-Boué et al., 2012	34
Figura 4.1	Representação de um sistema composto por gerador FV, da rede elétrica da concessionária e da carga linear utilizada em simulações	36

Figura 4.2	Representação de um sistema composto por gerador FV, da rede elétrica da concessionária de carga linear e não linear.....	38
Figura 4.3	Em (a) Valores instantâneos de tensão da rede e corrente no conjunto e em (b) Distorção harmônica de corrente percentual no conjunto reator + lâmpadas.....	39
Figura 4.4	Distorção Harmônica do conjunto reator eletônico + 2 lâmpadas fluorescentes de 32W ligadas em 127V, em (a) Distorção de Corrente em (b) Distorção de tensão	39
Figura 4.5	Circuito equivalente da rede elétrica a qual está conectada uma carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico mais duas lâmpadas fluorescentes de 32W utilizado para a simulação utilizado para a segunda simulação em (a) circuito proposto e em (b) circuito implementado no programa Microcap	42
Figura 4.6	Simulação Microcap do conjunto reator + lâmpadas no ponto PCC mostrado na figura 4.5 onde I(R1) é a corrente drenada do sistema.....	43
Figura 4.7	Forma de onda medida com o analisador Fluke 435 no conjunto reator e duas lâmpadas de 32W na rede 181,0 V de pico (128 V –RMS)	43
Figura 4.8	Em (a) Valores instantâneos de tensão da rede e corrente no micro e em (b) Distorção harmônica de corrente percentual no microcomputador.....	44
Figura 4.9	Distorção Harmônica de um microcomputador ligado em 127V, em (a) Distorção de Corrente em (b) Distorção de tensão.....	44
Figura 4.10	Circuito equivalente da rede elétrica a qual está conectada uma carga não linear microcomputador utilizado para a segunda simulação em (a) circuito proposto e em (b) circuito implementado no programa Microcap.....	46
Figura 4.11	Simulação Microcap do microcomputador no ponto PCC mostrado na figura 4.11 onde IR1 é a corrente drenada as fonte.....	47
Figura 4.12	Medição realizada com o Analizador Fluke 435, com ponteira de 40 A, na rede elétrica com o microcomputador	48
Figura 4.13	Circuito correspondente a 10 microcomputadores ligados em paralelo em uma mesma fonte.....	49
Figura 4.14	Simulação Microcap de 10 microcomputadores no ponto PCC mostrado na figura 4.11 onde IR1 é a corrente drenada as fonte.....	49
Figura 4.15	Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 172W	53

Figura 4.16	Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 980W	54
Figura 4.17	Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 2575W	55
Figura 4.18	Circuito implementado no programa Microcap para simular as três situações de potência do inversor Fronius IG30 em paralelo com o circuito com dez microcomputadores	56
Figura 4.19	Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 172W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez ,microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros	57
Figura 4.20	Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 980W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez ,microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros	58
Figura 4.21	Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 2575W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez ,microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Valores de correntes resultantes das expressões apresentadas nas equações 2.3, 2.4 e 2.5	10
Tabela 3.1	Limites admitidos de distorção na corrente. (Compilado de IEEE-1547,2003, e IEC-61727, 2004)	16
Tabela 3.2	Principais normas técnicas e seus respectivos níveis máximos	17
Tabela 3.3	Dados da rede elétrica da CEEE em um dado ponto da rede elétrica na cidade de Porto Alegre – subestação PAL 4, alimentador 459	20
Tabela 3.4	Parâmetros do Sistema proposto por Balathandayuthapani et al., 2011, para SFCR com rede e carga lineares	21
Tabela 3.5	Parâmetros de Simulação	23
Tabela 3.6	Parâmetros de simulação do Modelo de Hamadi et al.	26
Tabela 3.7	Parâmetros do sistema de distribuição do circuito mostrado na Figura 3.14 [Wu e Tao, 2009]	28
Tabela 3.8	Parâmetros das cargas ligadas às barras B1 e B2 do circuito mostrado na Figura 3.14 [Wu e Tao, 2009]	29
Tabela 4.1	Coefficientes em Ampères da Equação 4.1	41
Tabela 4.2	Coefficientes em Ampères da Equação 4.2	46
Tabela 4.3	Coefficientes em Ampères da Equação 4.3	49
Tabela 4.4	Medições realizadas pelo LABSOL em um inversor Fronius IG30 conectado a rede elétrica em três níveis de geração de potência (valores de corrente e tensão em p.u.) – 172W – 980W – 2575W	51
Tabela 4.5	Medições realizadas pelo LABSOL em um inversor Fronius IG30 conectado a rede elétrica em três níveis de geração de potência (valores de corrente e tensão em A e V de pico respectivamente) – 172W – 980W – 2575W	52
Tabela 4.6	Coefficientes em Ampères da Equação 4.4 para potência gerada de 172W	53
Tabela 4.7	Coefficientes em Ampères da Equação 4.5 para potência gerada de 980W	54
Tabela 4.8	Coefficientes em Ampères da Equação 4.6 para potência gerada de 2575W	55
Tabela 4.9	Coefficientes em Ampères da Equação 4.6 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 172W	57

Tabela 4.10	Coeficientes em Ampères da Equação 4.7 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 980W	58
Tabela 4.11	Coeficientes em Ampères da Equação 4.8 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 2575W	59

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CSI	<i>Current source inverter</i> (inversor fonte de corrente)
DL	<i>Damp load</i> (carga de recalque d'água)
DVD	<i>Digital video disk</i> (disco de vídeo digital)
FV	Fotovoltaico
GD	Geração distribuída
GEN	Gerador diesel
HD	<i>Hard disk</i> (disco rígido)
LABSOL	Laboratório de Energia Solar da UFRGS
LCD	<i>Liquid cristal display</i> (visor de cristal líquido)
MPP	<i>Maximum power point</i> (ponto de máxima potência)
MT	Média tensão
PCC	Ponto de conexão comum
PFC	<i>Power factor capacitor</i> (capacitor para correção do fator de potência)
PLL	<i>Phase locked loop</i> (elo travado em fase)
PWM	<i>Pulse width modulation</i> (modulação por largura de pulso)
RMS	<i>Root mean squared</i> (valor quadrático médio)
SCR	<i>Silicon controlled rectifier</i> (retificador controlado de silício)
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado à rede
THD	Distorção harmônica total
THDi	Distorção harmônica total de corrente
THDV	Distorção harmônica total de tensão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VSI	<i>Voltage source inverter</i> (inversor por fonte de tensão)

LISTA DE SÍMBOLOS

a_n	Coeficiente de Fourier do termo em cosseno da n ésima ordem.....	-
A_o	Componente contínua da corrente.....	[A]
b_n	Coeficiente de Fourier do termo em seno	-
C_{dc}	Capacitor filtro corrente contínua	[F]
C_n	Coeficiente “C” de n ésima ordem.....	-
C_{pv}	Capacitor para painel fotovoltaico	[F]
i_L	Corrente de linha	[A]
i_{Lo}	Corrente na carga	[A]
I_m	Corrente de máxima potência	[A]
I_{micro}	Corrente no microcomputador	[A]
IR_1	Corrente que a carga drena da fonte.....	[A]
I_{SC}	Corrente de curto circuito	[A]
i_1	Corrente na carga linear	[A]
i_2	Corrente na carga não linear	[A]
ϕ	Deslocamento angular da onda	[rad]
f	Frequência.....	[Hz]
f_o	Frequência fundamental da onda	[Hz]
kWp	Quilowatt de pico	[kW]
L	Indutância.....	[H]
L_{dc}	Indutância da rede CC das linhas elétricas entre painel e inversor	[H]
K_i	Ganho integral.....	-
K_p	Ganho proporcional.....	-
P	Potência elétrica	[W]
P_n	Potência elétrica nominal	[W]
R_C	Resistência da carga.....	[Ω]
R_{dc}	Resistência da rede CC das linhas elétricas entre painel e inversor.....	[Ω]
R_L	Resistência da linha.....	[Ω]
R_g	Resistência da rede.....	[Ω]
R_T	Resistência total	[Ω]
R_0	Resistência de seqüência zero	[Ω]

R_1	Resistência de seqüência positiva	[Ω]
S	Potência elétrica aparente.....	[kVA]
T_0	Período fundamental da onda.....	[s]
V	Tensão elétrica	[V]
V_C	Tensão na carga.....	[V]
V_L	Tensão na carga não linear.....	[V]
V_f	Tensão da fonte	[V]
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	[V]
V_T	Tensão sobre impedância equivalente total	[V]
ω	Velocidade angular da onda.....	[rad/s]
X_C	Reatância da carga	[Ω]
X_L	Reatância da linha	[Ω]
X_{Lg}	Reatância da rede	[Ω]
X_T	Reatância total.....	[Ω]
X_0	Reatância de seqüência zero	[Ω]
X_1	Reatância de seqüência positiva.....	[Ω]
Z_1	Impedância da carga linear	[Ω]
Z_2	Impedância da carga não linear.....	[Ω]
Z_L	Impedância da linha	[Ω]
Z_T	Impedância de Thevenin (equivalente da carga linear e da linha).....	[Ω]

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCRs) receberam uma atenção especial devido às preocupações com o meio ambiente advindas da utilização extensiva de combustíveis fósseis e suas repercussões ecologicamente negativas.

Apesar dos seus benefícios em termos ambientais, o SFCR ainda apresenta grande desvantagem quanto ao seu valor econômico quando comparado aos demais sistemas de geração de energia: nuclear, à base de óleo, de gás natural, de carvão, todos danosos ao meio ambiente, e, também, os sistemas hidroelétricos e eólicos [Benner e Kazmerski, 1999].

A utilização de SFCRs está aumentando em muitos países como resultado de avanços tecnológicos, políticas governamentais de incentivo às fontes renováveis de energia, preocupações ambientais, utilização junto às cargas, reduzindo, assim, os possíveis impactos negativos ao ambiente e custos de fabricação. Cresce, desta forma, o interesse em se implementar estratégias para utilizar a energia solar e adotar políticas mundiais em favor desta energia “verde” ou “limpa”. Contudo, o aumento significativo de SFCRs em geração conjunta às concessionárias de distribuição de energia apresenta novos problemas relacionados à segurança, à proteção dos sistemas, à interface com a rede e, especialmente, à qualidade de energia [Aiello et al., 2006].

No Brasil, a ANEEL publicou em 17 de abril de 2012, após consulta pública, a Resolução Normativa de número 482, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Nestes sistemas, enquadram-se: a) sistemas microgeradores distribuídos - aqueles cuja potência instalada seja menor ou igual a 100 kW, incluindo nestes, os sistemas de geração de energia solar, e b) sistemas minigeradores de energia - aqueles sistemas de geração com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, incluindo novamente aqueles geradores baseados em energia solar [ANEEL, 2012].

Os SFCRs podem ser constituídos por: a) grandes centrais geradoras (da ordem de dezenas de megawatts), normalmente localizadas longe das cargas as quais irão alimentar e normalmente conectadas a sistemas de transmissão ou subtransmissão de energia (redes elétricas de média e alta tensão); ou b) pequenas centrais geradoras fotovoltaicas (da ordem de quilowatts ou dezenas de quilowatts) instaladas juntamente às cargas, ligadas diretamente à rede de distribuição de energia elétrica (rede elétrica de baixa tensão), cuja denominação é dada Geração Distribuída (GD). Uma das vantagens dos sistemas fotovoltaicos utilizados

como geração distribuída é a possibilidade de aplicação em meios urbanos, onde há grande consumo de energia, através da instalação em edifícios, condomínios residenciais, casas isoladas, indústrias e comércios.

Os principais componentes de um SFCR são os módulos fotovoltaicos e os inversores eletrônicos. Os módulos fotovoltaicos contribuem com um percentual elevado para o custo global dos SFCRs, porém apresentam uma tendência, a nível mundial, de queda destes custos devido ao aumento da utilização deste tipo de energia. Com relação aos inversores, estes podem ser fabricados com as topologias *Voltage Source Inverter* (VSI), que utiliza uma fonte de tensão, ou *Current Source Inverter* (CSI), que utiliza uma fonte de corrente, conforme mostrado na Figura 1.1. Estas duas configurações correspondem ao tipo de utilização junto à rede elétrica da concessionária de energia ao qual está conectada.

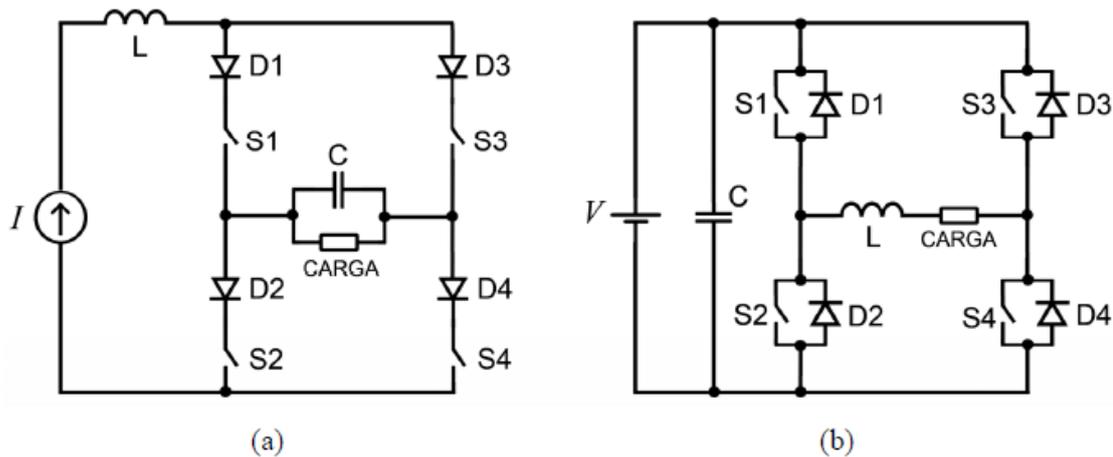


Figura 1.1 – (a) Inversor fonte de corrente (CSI) e (b) inversor fonte de tensão (VSI).

Para a adequada utilização destes sistemas devem ser consideradas também, questões de segurança, tais como, entre outros, a implementação de dispositivos de prevenção de ilhamento (caso em que há geração de energia quando a rede está desligada ou sem tensão) e a redução do conteúdo harmônico injetado na rede.

A circulação de correntes com formas de ondas deformadas através do uso de cargas não lineares vem aumentando significativamente, gerando deformações também na forma de onda da tensão elétrica aplicada. Concessionárias de energia elétrica e consumidores têm acusado problemas no funcionamento de dispositivos eletro-eletrônicos devido a este problema.

A maioria dos equipamentos residenciais conectados à rede tais como televisores, microcomputadores, lâmpadas fluorescentes (principalmente aquelas alimentadas através de reatores eletrônicos), aparelhos eletrônicos em geral, refrigeradores (estes devido aos

controles eletrônicos incluídos nos equipamentos mais modernos), máquinas de lavar roupa, chuveiros elétricos com controle eletrônico, entre outros dispositivos, possuem equipamentos digitais de processamento ou dispositivos eletrônicos que recortam a onda de alimentação elétrica.

A maioria dos equipamentos eletrônicos e/ou de processamento das informações têm seus circuitos internos de controle e processamento trabalhando em corrente contínua (CC). Para energizar estes circuitos, é feita a conversão da energia da rede em corrente alternada (CA) para corrente contínua. Esta conversão CA/CC é feita através de fontes de alimentação (normalmente chaveadas) as quais, devido ao seu princípio de operação, provocam perturbações com a injeção de distorção harmônica na rede.

Como exemplo, podemos citar o chuveiro elétrico com controle eletrônico de temperatura, no qual um dispositivo eletrônico de estado sólido interrompe a tensão aplicada sobre a resistência do chuveiro através do “recorte” da onda, gerando um grande conteúdo harmônico que é injetado na rede elétrica.

A Figura 1.2 apresenta a ilustração de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma instalação residencial, indicando todos os componentes usualmente utilizados.

No ambiente comercial e industrial também é crescente a utilização de equipamentos eletrônicos, incluindo-se aí sistemas de iluminação, automação e controle. Na área industrial, mais máquinas estão utilizando controladores eletrônicos microprocessados, que necessitam, como mencionado anteriormente, de conversão CA/CC, pois todo o sistema digital é baseado em CC. No ambiente comercial, o fato se repete porque a maioria dos equipamentos comerciais e principalmente os bancários, apresentam algum tipo de sistema eletrônico instalado, também necessitando deste tipo de alimentação, propiciando assim o aumento da distorção harmônica da rede a qual estão conectados.

Os SFCRs, por serem compostos de equipamentos eletrônicos que também podem produzir este tipo de perturbação na rede, devem ser projetados para atender as legislações específicas quanto a sua fabricação no que se refere à emissão de harmônicos e à conexão com a rede elétrica. Os inversores de SFCRs devem, entre suas características construtivas, monitorar a qualidade da energia elétrica e somente fornecer energia se a rede estiver presente e com suas características padrão [Urbanetz Junior, 2010].

Ao entregarem energia à rede, os inversores injetam uma forma de onda de corrente que deveria ser puramente senoidal. Contudo, dependendo do inversor e do percentual de potência que está sendo processado em relação a sua potência nominal, a corrente apresentará certo grau de distorção.

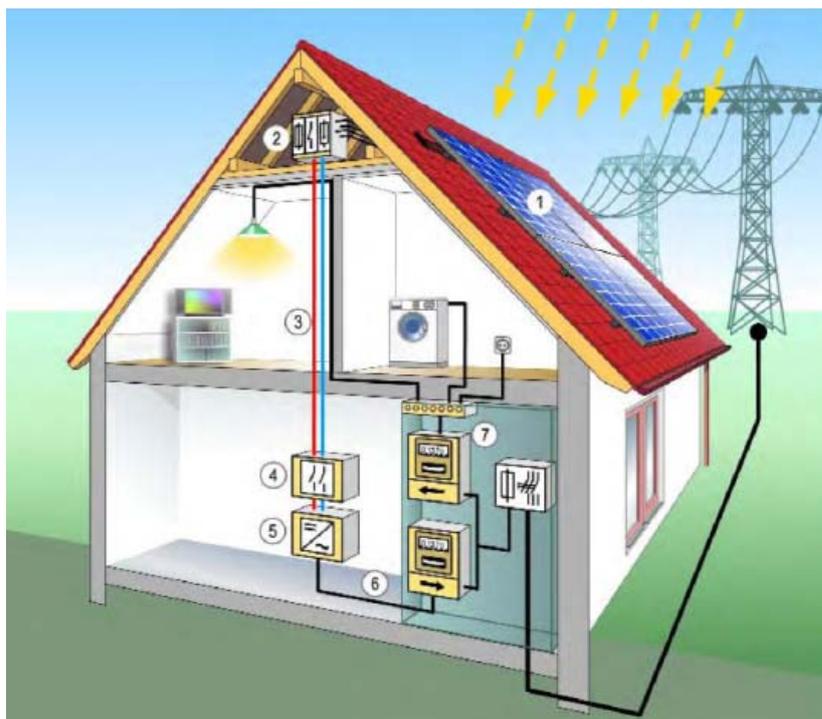


Figura 1.2 – Sistema fotovoltaico conectado à rede instalado em uma residência: (1) gerador fotovoltaico, (2) caixa de conexões CC, (3) cabeamento, (4) disjuntores de proteção, (5) inversor, (6) cabeamento CA e (7) quadros de medição, distribuição e disjuntor CA [DGS, 2008].

A rede pública de baixa tensão deve possuir um grau de qualidade na energia elétrica que permita o funcionamento dos inversores de SFCR. Estes devem operar com elevado fator de utilização, ou seja, devem estar aptos a gerar energia elétrica sempre que houver irradiação solar incidindo sobre os painéis fotovoltaicos.

Portanto, se as variantes que influenciam a qualidade da energia no ponto onde se deseja fazer a conexão de um SFCR puderem ser previstas e levadas em consideração durante o seu anteprojeto, possivelmente poderão ser tomadas as medidas necessárias a minimizar o efeito das mesmas.

Anomalias na qualidade de energia da rede elétrica pública podem fazer com que o inversor rejeite a rede. Essa rejeição impede o funcionamento do inversor, não permitindo o mesmo conectar-se à rede. Dependendo da magnitude da instalação, a sua influência sobre os parâmetros de qualidade da energia elétrica disponibilizada pela rede também deve ser considerada.

1.1 Objetivos da dissertação

O objetivo central da dissertação é disponibilizar de uma ferramenta que possa modificar os parâmetros elétricos (rede elétrica ou carga) e, assim, influir na qualidade de energia. Esta ferramenta será de grande valia para a análise de desempenho dos SFCRs, pois a análise de circuitos elétricos CA com cargas não lineares alimentadas por SFCR é ainda pouco estudada.

A proposta deste trabalho consiste em mapear o conteúdo harmônico de corrente, já que, nas considerações adotadas, a fonte de energia da concessionária mantém o mesmo nível de tensão. A partir dele, então, a carga medida é modelada através de múltiplas fontes de corrente com formas de onda senoidais ligadas em paralelo à rede, sendo cada uma destas fontes, com frequência correspondente a uma harmônica captada pela medição.

Além disso, este trabalho propõe um modelo matemático para dois tipos de cargas não lineares monofásicas, dentre eles: 1) microcomputador tipo *desktop* com monitor de cristal líquido de 15 polegadas, equipado com disco rígido de 500 MB e gravador de DVD; 2) um conjunto de iluminação composto de reator eletrônico de alto fator de potência (maior que 0,98) para duas lâmpadas fluorescentes de 32 W e duas lâmpadas fluorescentes tubulares bulbo T5 de 32 W.

1.2 Escopo da dissertação

No presente trabalho são revistos os conceitos e conteúdos relativos às redes elétricas e seu conteúdo harmônico no capítulo 2. Após, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os SFCRs no capítulo 3. Por fim, no capítulo 4 é proposta uma modelagem de cargas não lineares, que poderão ser adicionadas aos modelos de análise em programas de computadores, em especial no FVCONNECT (LABSOL-UFRGS), que simula sistemas fotovoltaicos. O enfoque do trabalho não se dará no funcionamento eletrônico dos inversores, mas sim na rede e, principalmente, nas cargas às quais eles serão conectados. Desta maneira, será possível simular com mais fidelidade os efeitos do conteúdo harmônico já existente na rede elétrica ao qual o SFCR está conectado e o próprio conteúdo harmônico que este introduz.

2 REVISÃO DE CONTEÚDOS

2.1 Harmônicas

2.1.1 Conceituação física das componentes harmônicas

Harmônica é a componente senoidal de uma tensão ou corrente alternada, com frequência igual a um múltiplo da frequência do sistema. O número de vezes que a frequência da componente harmônica é múltipla (inteira) da frequência fundamental é chamado de ordem harmônica. Distorção harmônica total (THD) é a relação entre o valor médio quadrático de todas as componentes harmônicas de um dado sinal (tensão ou corrente) e o valor médio quadrático da fundamental do mesmo sinal, sendo dada pela equação 2.1.

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n} / Y_1 \quad (2.1)$$

onde: Y_1 = componente de primeira ordem (fundamental), Y_n = componente de enésima ordem.

Matematicamente, uma forma de onda periódica não senoidal, de frequência f_0 , pode ser decomposta em um somatório de infinitos termos senoidais, cujas frequências, múltiplas de f_0 , são dadas por $n \cdot f_0$ com $n = 1, 2, 3, 4 \dots$, mais um termo igual ao valor médio apresentado pela forma de onda original. Este somatório é conhecido como “Série de Fourier”. O termo senoidal de frequência f_0 é chamado de componente fundamental e os termos de frequências múltiplas da fundamental, são denominadas por componentes harmônicas. Desta forma, uma onda qualquer no domínio do tempo $Y(t)$ com frequência f_0 pode ser decomposta da seguinte forma :

$$Y_{(t)} = Y_0 + Y_1 \text{ sen}(\omega t + \varphi_1) + Y_2 \text{ sen}(2 \cdot \omega t + \varphi_2) + Y_3 \cdot \text{sen}(3 \cdot \omega t + \varphi_3) + \dots + Y_n \cdot \text{sen}(n \cdot \omega t + \varphi_n) \quad (2.2)$$

onde: Y_0 = componente contínua, Y_n = componente de enésima ordem, ωt = deslocamento angular dado por $2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t$ (rad), φ_1 = defasagem angular da componente fundamental (graus elétricos), $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \dots \varphi_n$ = defasagem angular (rad) das componentes de ordem n .

A Figura 2.1 mostra a decomposição gráfica da forma de onda $Y(t)$ em duas de suas componentes (1ª e 5ª).

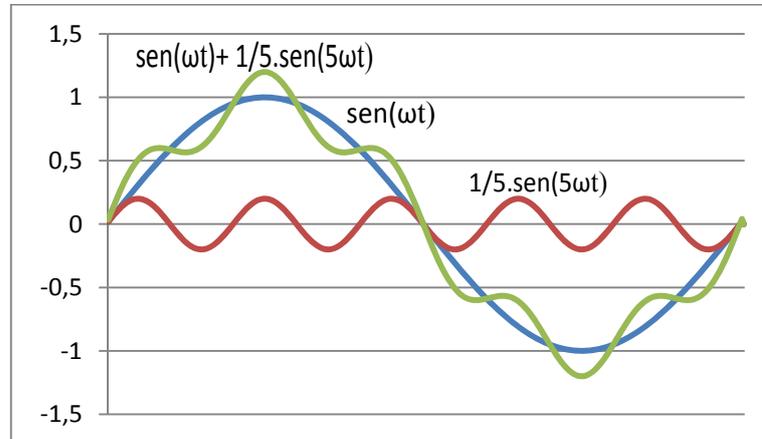


Figura 2.1 – Forma de Onda Hipotética $Y(t)$.

2.1.2 Conceituação das componentes harmônicas em rede elétrica de 60 Hz – corrente alternada

As formas de ondas de tensão e corrente em sistemas de corrente alternada são puramente na frequência única (f_0) de 60 Hz, periódica com períodos iguais e de valor $T_0 = 1/f_0 = 16,67$ ms. Assim, quando da existência de harmônicos no sistema de distribuição, suas componentes, de acordo com o item 2.1.1, terão frequências todas múltiplas de $f_0 = 60$ Hz.

A forma da onda completa $Y_{(t)}$ é escrita em função de suas componentes (quando existirem) de frequências múltiplas da frequência fundamental. Para componente de n ésima harmônica tem-se, $n \cdot \omega_0 = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0$,

onde

$n \cdot \omega_0 = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 = n \cdot 377$ rad/s, ou $n \cdot 2f_0 = n \cdot 60$ Hz, que será múltiplo da frequência fundamental, 60 Hz.

2.1.3 O surgimento das componentes harmônicas

Só existirão componentes harmônicas de tensão ou de corrente se a forma de onda de algumas destas grandezas contiver alguma deformação. Entende-se por deformação qualquer

descaracterização que haja na forma de onda senoidal (Figura 2.2). Tais deformações são produzidas por cargas não lineares, ligadas à rede elétrica.

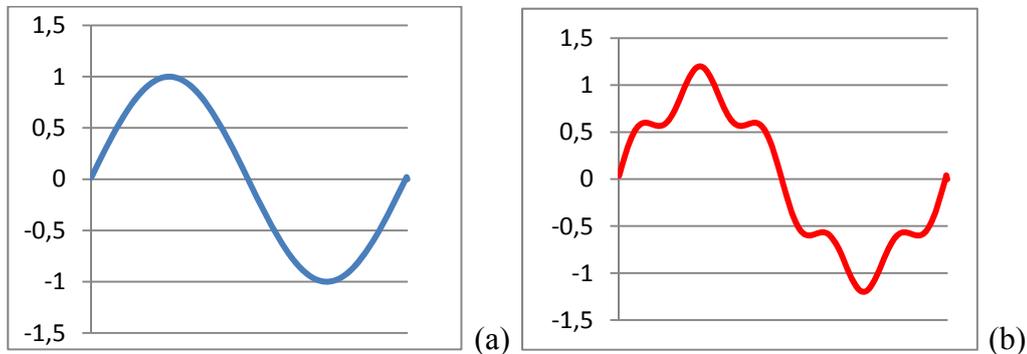


Figura 2.2 – (a) Onda senoidal pura e (b) deformação na forma de onda senoidal causada pelo conteúdo harmônico.

2.1.4 Quantificação das amplitudes das componentes harmônicas

Seja uma forma de onda $Y(t)$ no domínio do tempo, com a existência de um certo grau de deformação (Figura 2.2b). Pode-se decompô-la em suas componentes harmônicas utilizando-se da série de Fourier, através da equação 2.2, onde : $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \dots Y_n =$ são as amplitudes das componentes fundamental e harmônicas, e Y_0 a componente contínua.

O valor máximo de cada componente múltipla da fundamental será : $Y_2; Y_3; Y_4; \dots ; Y_n$.

Assim, a forma teórica completa da equação será como a da equação 2.2.

2.1.5 Componentes harmônicas no sistema elétrico trifásico

Um sistema trifásico pode apresentar distorções de corrente e/ou tensão que podem ser equilibradas ou desequilibradas. Por exemplo (Figura 2.3), um sistema trifásico equilibrado na distribuição de corrente apresenta formas de ondas de maneira idêntica nas três fases, apenas defasadas de 120° entre si. Junto às cargas, estas correntes podem ficar distorcidas devido à natureza das mesmas. Neste caso, a análise de Fourier resulta, genericamente para as três fases, em equações semelhantes com amplitudes iguais para as harmônicas em cada fase.

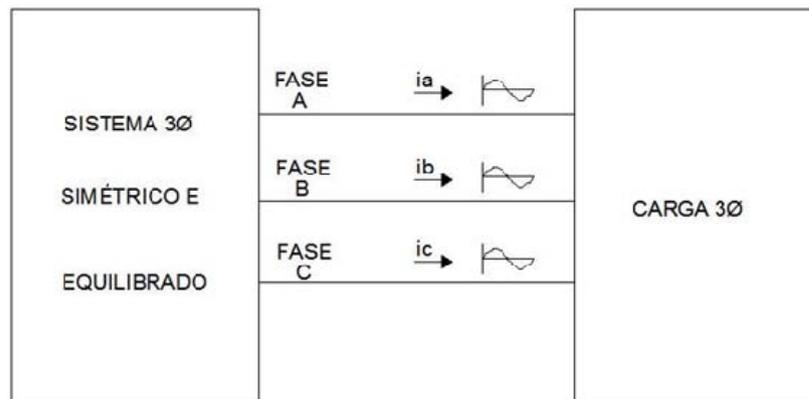


Figura 2.3 – Sistema trifásico equilibrado na distribuição de corrente com distorção da mesma junto à carga.

2.1.5.1 Sequência positiva (direta), negativa (inversa) e zero (em fase) das componentes harmônicas

Considera-se um sistema elétrico trifásico simétrico e equilibrado, ou seja, tensões e correntes com amplitudes idênticas e sequência positiva de fase, com defasamento de 120° entre fases e, ainda, a forma de onda de corrente, junto à carga, com um certo grau de deformação, de acordo com a Figura 2.3, onde i_a , i_b e i_c são correntes deformadas e não senoidais.

Nestas condições, resultarão, genericamente para as três fases, as seguintes expressões de corrente:

$$i_a = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t + \varphi_7) + I_8 \cdot \text{sen}(8\omega t + \varphi_8) + I_9 \cdot \text{sen}(9\omega t + \varphi_9) + \dots \quad (2.3)$$

$$i_b = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t - 120 + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t + 120 + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t - 120 + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t + 120 + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t - 120 + \varphi_7) + I_8 \cdot \text{sen}[(8\omega t + 120 + \varphi_8)] + I_9 \cdot \text{sen}(9\omega t + \varphi_9) + \dots \quad (2.4)$$

$$i_c = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + 120 + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t - 120 + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t + 120 + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t - 120 + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t + 120 + \varphi_7) + I_8 \cdot \text{sen}[(8\omega t - 120 + \varphi_8)] + I_9 \cdot \text{sen}(9\omega t + \varphi_9) + \dots \quad (2.5)$$

Segundo o Teorema de Fortescue [Universidade de Minho, 2009], para sistema elétrico trifásico ($n=3$), cada um dos três fasores, de um sistema trifásico desequilibrado, pode ser decomposto da soma vetorial de outros três vetores pertencentes a três sistemas equilibrados trifásicos. Os três sistemas equilibrados são assim denominados: sistemas de sequência positiva, de sequência zero e de sequência negativa, que é mostrado nas equações (2.3), (2.4) e (2.5).

Os valores resultantes das equações (2.3), (2.4) e (2.5) referentes às componentes harmônicas nas três correntes estão apresentados na Tabela 2.1. Desta forma, observa-se a componente fundamental e as harmônicas de ordem 4, 7, 10, ..., subtraem 120° de seus argumentos, caracterizando-as como harmônicas de sequência positiva. As componentes de ordem 2, 5, 8, ..., somam 120° a seus argumentos, caracterizando-as como harmônicas de sequência negativa. Já as harmônicas de ordem 3, 6, 9, ... , múltiplas de três, estão totalmente *em fase* nas três fases, caracterizando-as como harmônicas de sequência zero.

Tabela 2.1 – Valores de correntes resultantes das expressões apresentadas nas equações 2.3, 2.4 e 2.5.

Ordem da Harmônica	Correntes		
	Fase A	Fase B	Fase C
1 ^a (Fundamental)	$I_1 \text{ sen}(\omega \cdot t + \phi_1)$	$I_1 \text{ sen}(\omega \cdot t - 120 + \phi_1)$	$I_1 \text{ sen}(\omega \cdot t + 120 + \phi_1)$
2 ^a - Negativa	$I_2 \text{ sen}(2 \cdot \omega \cdot t + \phi_2)$	$I_2 \text{ sen}(2 \cdot \omega \cdot t + 120 + \phi_2)$	$I_2 \text{ sen}(2 \cdot \omega \cdot t - 120 + \phi_2)$
3 ^a – Zero	$I_3 \text{ sen}(3 \cdot \omega \cdot t + \phi_3)$	$I_3 \text{ sen}(3 \cdot \omega \cdot t + \phi_3)$	$I_3 \text{ sen}(3 \cdot \omega \cdot t + \phi_3)$
4 ^a – Positiva	$I_4 \text{ sen}(4 \cdot \omega \cdot t + \phi_4)$	$I_4 \text{ sen}(4 \cdot \omega \cdot t - 120 + \phi_4)$	$I_4 \text{ sen}(4 \cdot \omega \cdot t + 120 + \phi_4)$
5 ^a - Negativa	$I_5 \text{ sen}(5 \cdot \omega \cdot t + \phi_5)$	$I_5 \text{ sen}(5 \cdot \omega \cdot t + 120 + \phi_5)$	$I_5 \text{ sen}(5 \cdot \omega \cdot t - 120 + \phi_5)$
6 ^a – Zero	$I_6 \text{ sen}(6 \cdot \omega \cdot t + \phi_6)$	$I_6 \text{ sen}(6 \cdot \omega \cdot t + \phi_6)$	$I_6 \text{ sen}(6 \cdot \omega \cdot t + \phi_6)$
7 ^a – Positiva	$I_7 \text{ sen}(7 \cdot \omega \cdot t + \phi_7)$	$I_7 \text{ sen}(7 \cdot \omega \cdot t - 120 + \phi_7)$	$I_7 \text{ sen}(7 \cdot \omega \cdot t + 120 + \phi_7)$
8 ^a - Negativa	$I_8 \text{ sen}(8 \cdot \omega \cdot t + \phi_8)$	$I_8 \text{ sen}(8 \cdot \omega \cdot t + 120 + \phi_8)$	$I_8 \text{ sen}(8 \cdot \omega \cdot t - 120 + \phi_8)$
9 ^a – Zero	$I_9 \text{ sen}(9 \cdot \omega \cdot t + \phi_9)$	$I_9 \text{ sen}(9 \cdot \omega \cdot t + \phi_9)$	$I_9 \text{ sen}(9 \cdot \omega \cdot t + \phi_9)$
10 ^a - Positiva	$I_{10} \text{ sen}(10\omega \cdot t + \phi_{10})$	$I_{10} \text{ sen}(10\omega t - 120 + \phi_{10})$	$I_{10} \text{ sen}(10\omega t + 120 + \phi_{10})$
Segue....	.	.	.

Resumidamente, sequência positiva corresponde às ordens $3.k + 1$; sequência negativa corresponde às ordens $3.k - 1$ (giram no sentido contrário à sequência positiva); sequência zero corresponde às ordens $3.k$, com $k = 1, 2, 3, \dots$ (estão *em fase*).

O conceito da componente de sequência simétrica em correntes e tensão é fundamental para a quantificação dos efeitos causados pelas harmônicas em toda e qualquer carga, principalmente nas cargas girantes ou naquelas que têm como princípio de funcionamento os campos magnéticos induzidos, tais como motores elétricos, aparelhos de medição, eletroímãs, entre outros dispositivos.

2.1.5.2 O efeito do desequilíbrio de tensão na geração harmônica

Toda carga não linear tem como característica a geração de correntes harmônicas. Como exemplo, se for considerado um retificador de 6 pulsos (6 diodos), verifica-se que o mesmo, de acordo com estas características, apresenta somente harmônicas de ordem ímpar devido a simetria de implementação do circuito, assim como praticamente todas as fontes que alimentam circuitos eletrônicos. Nesta situação, tais harmônicas são denominadas “harmônicas características”. Se surgirem harmônicas pares neste tipo de carga devido a alguma anomalia ocorrida na carga ou em sua fonte, tais harmônicas serão denominadas “harmônicas não características”. Uma das causas para o surgimento de harmônicas não características é o desequilíbrio de tensão no sistema elétrico de distribuição.

Observando o diagrama da Figura 2.3, simétrico e equilibrado, e de acordo com os resultados contidos na Tabela 2.1, nota-se que as harmônicas múltiplas de três (3, 6, 9 ...), estão *em fase*. Se a referida carga estiver com ligação do tipo triângulo (fase A com fase B, fase B com fase C e fase C com fase A), significará que não existe fluxo de correntes harmônicas múltiplas de três da carga para a fonte, ficando as mesmas confinadas no triângulo. Caso haja qualquer desequilíbrio na alimentação da carga, estas harmônicas (múltiplas de três) não estarão mais “em fase”, acarretando a existência de harmônicas não características fluindo entre a carga e a fonte.

2.1.6 Sentido do fluxo de potência harmônico – geração/consumo

Seja o circuito mostrado na Figura 2.4, onde a fonte V_f , puramente senoidal, alimenta uma carga Z_2 de características não lineares (geradora de harmônicas).

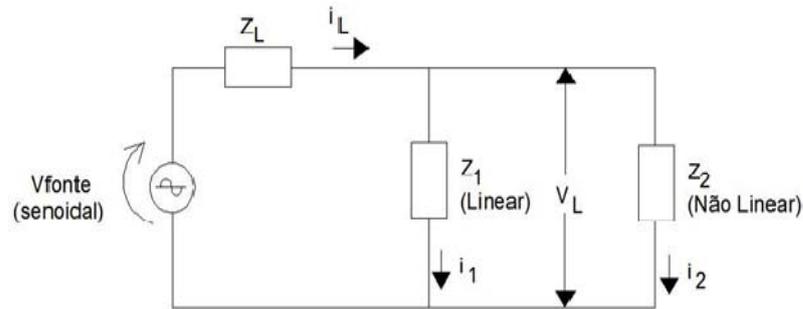


Figura 2.4 – Circuito equivalente monofásico mostrando fonte de tensão ideal com impedância da linha (Z_L) e as cargas linear (Z_1) e carga não linear (Z_2).

A corrente deformada i_2 aliada à impedância Z_2 produz uma queda de tensão também deformada em Z_L (impedância da linha), acarretando uma distorção na tensão da carga não linear V_L bem como na corrente i_1 da carga Z_1 . As correntes e a tensão distorcidas podem ser interpretadas através da série de Fourier, transformando-as em componentes harmônicos e fundamental. Conhecendo as componentes individuais de tensão e corrente, pode-se determinar as potências harmônicas de cada componente.

O circuito mostrado na Figura 2.5, é o resultado do cálculo do circuito equivalente de Thevenin na carga Z_2 onde:

$$Z_T = (Z_1 \cdot Z_L) / (Z_1 + Z_L) \quad (2.6)$$

$$V_T = V_f \cdot [Z_1 / (Z_1 + Z_L)] \quad (2.7)$$

$$V_L = V_T - Z_T \cdot i_2 \quad (2.8)$$

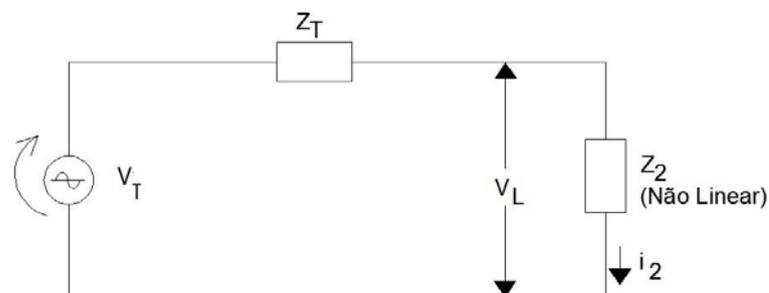


Figura 2.5 - O circuito equivalente de Thevenin resultante da carga linear e da linha (Z_T) e a carga não linear (Z_2)

Considerando a não linearidade da carga Z_2 , pode-se representar a corrente i_2 , através de uma série de Fourier, da seguinte forma

$$i_2 = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n \cdot \omega t + b_n \cdot \text{sen } n \cdot \omega t) \quad (2.9)$$

ou

$$i_2 = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cdot \text{sen}(n \cdot \omega t + \varphi_n)) \quad (2.10)$$

onde A_0 é a componente contínua da corrente i_2 quando esta componente existir, n é a ordem harmônica, a_n é o coeficiente de Fourier do termo em cosseno, b_n é o coeficiente de Fourier do termo em seno e a equação representa C_n como

$$C_n = \sqrt{(a_n)^2 + (b_n)^2} \quad (2.11)$$

Pela equação (2.8), considerando a linearidade de V_f , Z_1 e Z_L , implica tal fato na linearidade de V_T , que é a tensão sobre Z_T , podendo a mesma ser representada da seguinte forma

$$V_T = V \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.12)$$

onde V é o valor máximo de V_T .

De (2.10) e (2.12) em (2.8) tem-se :

$$V_L = [V \cdot \text{sen}(\omega \cdot t)] - \{Z_T(n) \cdot [A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} ((a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) + b_n \cdot \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t)))]\} \quad (2.13)$$

que é a tensão aplicada nas cargas Z_1 e Z_2 .

O termo $Z_T(n)$ da equação (2.13) é devido ao fato do valor da impedância $Z_T(n)$ variar para cada frequência, acarretando na seguinte decomposição:

$$Z_T(0) = R_0 \quad (2.14)$$

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ Z_T(n) \\ \downarrow \end{array}$$

$$Z_T(n) = R_T(n) + j \cdot X_T(n) \quad (2.15)$$

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os painéis fotovoltaicos produzem energia elétrica em CC. A conversão de energia ocorre através dos inversores para SFCR. A saída do inversor é colocada diretamente em paralelo com a rede elétrica convencional que, por sua vez, também está conectada à carga. Desta maneira, há duas ondas de tensão (do inversor e da rede) que devem estar em fase e ter características elétricas bastante similares, de modo que possa ocorrer o paralelismo entre o SFCR e a concessionária. A onda senoidal produzida pelo inversor utiliza a onda da rede elétrica como referência. Se existir esta referência, há geração fotovoltaica; caso contrário, o SFCR, através do dispositivo de “anti-ilhamento”, para de entregar energia para a concessionária, desconectando-se. Os requisitos anti-ilhamento para os inversores utilizados em SFCR são descritos nas normas NBR-IEC 62116, 2012, IEC 61727, 2004, DIN VDE 0126-1-1, 2006, IEEE-1547,2003 e IEEE-519, 1992. A maioria dos inversores dos SFCR utilizam técnicas de monitoramento da tensão e da frequência, e, através destas, detectam o desligamento da rede elétrica. Entretanto, um terceiro método de evitar o ilhamento é utilizado. Este é denominado de método de monitoramento através da impedância da rede elétrica. Já bem estabelecido na Alemanha, este último sugere que para SFCR menores que 5 kWp, a impedância deve ser menor que $1,75 \Omega$ e sua variação deve ser menor que $0,5 \Omega$ [Luque e Hegedus, 2003].

3.1 Inversores e tipos de sincronização dos mesmos com a rede

Os inversores para SFCR também estão divididos em dois grupos: os comutados pela rede e os autocomutados. Os inversores comutados pela rede são normalmente usados para altas potências, acima de 20 kW, enquanto os autocomutados são geralmente usados em potências menores [Heskes e Enslim, 2003]. Os inversores autocomutados, em sua maioria, geram o formato da corrente de saída baseado em uma tabela programada em um processador interno, e a sincronização com a rede elétrica é obtida com o auxílio de um circuito *phase locked loop* (PLL). Alguns inversores combinam sincronização e referência a partir da tensão da rede. Porém, se a tensão da rede é poluída, esta referência também o será, prejudicando a saída do mesmo, tanto em corrente gerada como em tensão [Heskes e Enslim, 2003].

Nos SFCRs os inversores são concebidos com diferentes circuitos de conversão de energia e opções de transformadores de acoplamento com a rede. Podem também, ser categorizados com base no número de estágios de processamento de energia, localização dos capacitores de desacoplamento, transformador de baixa ou de alta frequência ou ausência do mesmo, e tipo de interface com a rede elétrica [Kjaer et al., 2005]. Um único ou múltiplos estágios de processamento de energia são os elementos responsáveis por adaptar o nível de tensão CC do painel FV e fazer a busca do ponto de máxima potência (MPP). Capacitores de desacoplamento são utilizados nos circuitos dos inversores em paralelo com o painel FV e também no barramento CC dos múltiplos estágios. Os transformadores de acoplamento são responsáveis pela adaptação do nível de tensão e pela isolação galvânica entre o SFCR e a rede elétrica, permitindo o aterramento do painel FV quando este for necessário.

Quanto à interface com a rede elétrica, a mesma define como o inversor deve operar: se operando no modo fonte de corrente (CSI) ou no modo fonte de tensão (VSI), além da existência de filtros de saída [Kjaer et al., 2005].

O estágio de saída dos inversores requer a presença dos filtros de saída formados por indutores e capacitores, devido ao sistema de reconstrução das ondas de tensão e corrente, para reduzir o conteúdo harmônico da corrente injetada na rede elétrica [Badoud e Khemliche, 2011], conforme mostrado na Figura 3.1.

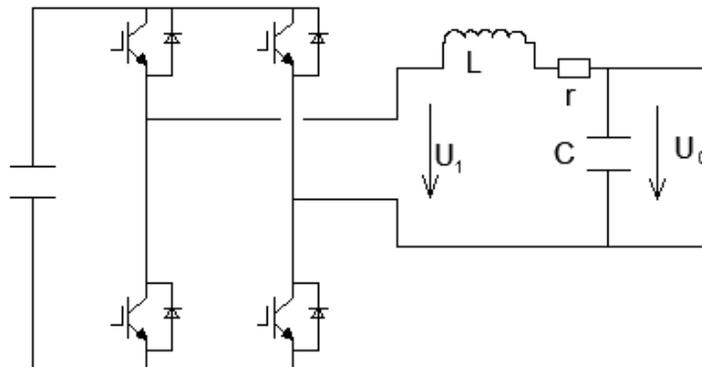


Figura 3.1 – Modelo do inversor de um sistema FV para conexão com a rede elétrica pública.

Os SFCR operam no modo de geração durante parte do dia, e podem auxiliar na melhoria da qualidade de energia através da melhora do balanço de energia ativa / reativa. O inversor pode, através de um arranjo eletrônico denominado “*shunt active power filter*” (filtro

ativo), melhorar a qualidade de energia da rede em períodos de irradiação fraca ou à noite [Chen et al., 2008].

Cada topologia possui características próprias, o que implica em vantagens e desvantagens umas em relação às outras, as quais podem ser citadas: o número de chaves eletrônicas; necessidade de isolamento do sinal aplicado ao gatilho das chaves superiores da ponte (meia ponte ou ponte completa); isolação galvânica com transformador de alta ou baixa frequência, ou, até mesmo, ausência de transformador; frequência de chaveamento das chaves eletrônicas, quantidade de circuitos de busca de MPP; faixa de valores da tensão CC de entrada e da tensão CC efetivamente entregue ao circuito inversor (meia ponte ou ponte completa); circuitos de proteção.

3.2 Limites de operação de sistemas conectados à rede e normas técnicas de conexão

Com relação à aplicação dos inversores comerciais, existem limites de operação atrelados aos parâmetros elétricos da rede ao qual o inversor é conectado. Um dos maiores fabricantes mundiais de inversores para SFCR, a SMA Solar Technology AG, estipula valores limites quanto ao nível de tensão, a frequência da rede e a impedância da linha (SMA, 2008b; 2005).

A forma de onda obtida na saída dos inversores de SFCR deve possuir baixa distorção harmônica. Segundo as normas “IEEE-1547,2003, e IEC-61727, 2004”, a distorção harmônica total da corrente (THDi) deve ser menor que 5% da corrente fundamental e cada harmônica individual deve estar limitada conforme apresentado na Tabela 3.1 [IEC-61727, 2004 e IEEE-1547,2003].

Tabela 3.1: Limites admitidos de distorção na corrente. (Compilado de IEEE-1547,2003, e IEC-61727, 2004).

Ordem dos harmônicos	Limite de distorção
$2^a < 11^a$	< 4,0%
$11^a < 17^a$	< 2,0%
$17^a < 23^a$	< 1,5%
$23^a < 35^a$	< 0,6%
Acima da 33^a	< 0,3%

É motivo de constante pesquisa a interface propiciada pelo inversor do SFCR e a rede elétrica, devido à produção de harmônicas pelo mesmo, pois trata-se de dispositivo eletrônico, que como tal, produz este tipo de distúrbio na rede.

Na Tabela 3.2, observam-se as principais normas técnicas e seus respectivos níveis máximos determinados pelos normativos [Kjaer et al., 2005].

Tabela 3.2 – Principais normas técnicas e seus respectivos níveis máximos.

Conteúdo	IEC61727, 2004	IEEE1547,2003	EN61000-3-2, 2008
Potência nominal	10 kW	30 kW	16 A x 230 V = 3,7 kW
Correntes harmônicas (Ordem -h) Limites	(3 ^a -9 ^a) 4,0% (11 ^a -15 ^a) 2,0% (17 ^a -21 ^a) 1,5% (23 ^a -33 ^a) 0,6%	(2 ^a -10 ^a) 4,0% (11 ^a -16 ^a) 2,0% (17 ^a -22 ^a) 1,5% (23 ^a -34 ^a) 0,6% (>35 ^a) 0,3%	(3 ^a) 2,3 A (5 ^a) 1,14 A (7 ^a) 0,77 A (9 ^a) 0,40 A (11 ^a) 0,33 A (13 ^a) 0,21 A (15 ^a -39 ^a) 2,25/h
	Mesmo harmônicas nesses intervalos devem ser inferiores a 25% dos limites harmônicos ímpares listados.		Aproximadamente 30% dos harmônicos ímpares – veja padrão.
Corrente Máxima THDi	5,0%		-
Fator de Potência a 50% da potência nominal	0,90	-	
Injeção da corrente CC	Menos de 1,0% da corrente de saída nominal	Menos de 0,5% da corrente de saída nominal	< 0,22 A – corresponde a 50W de retificador de meia-onda
Faixa de tensão para operação normal	85%-110% (196 V – 253 V)	88%-110% (97 V – 121 V)	-
Faixa de frequência para operação normal	50 ± 1 Hz	59,3 Hz a 60,5 Hz	-

Fonte: Kjaer et al., 2005

3.3 Aspectos da geração de harmônicos em sistema FV de acordo com insolação

De acordo com Fekete et al., 2012, para diversos tipos de insolação, tomando como base as medições efetuadas em sistemas existentes na Croácia, mostrados na Figura 3.2, nota-se que as componentes harmônicas de tensão situam-se entre 2,5 e 4% independente da relação Potência Elétrica (P) / Potência Nominal (Pn) sobre o arranjo fotovoltaico. Já as componentes harmônicas de corrente, passam de 100% para relações P/Pn muito baixas, correspondendo a períodos de insolação baixa.

Com base nas distorções harmônicas da corrente gerada pelos SFCR, valores muito elevados ocorrem, tanto no início da manhã, como nas horas próximas à noite, conforme mostrado na Figura 3.3.

Nestes períodos, os SFCR trabalham com insolação baixa, produzindo na saída do sistema, THDi maiores do que 100% para até 10% de P/Pn, e mantendo-se abaixo dos 20% para insolação que gere uma relação de potências de 20% para P/Pn.

Estes mesmos problemas de distorção harmônicas são devidos ao efeito de sombreamento sobre os SFCR, pois a sombra diminui a insolação e conseqüentemente a produção de energia.

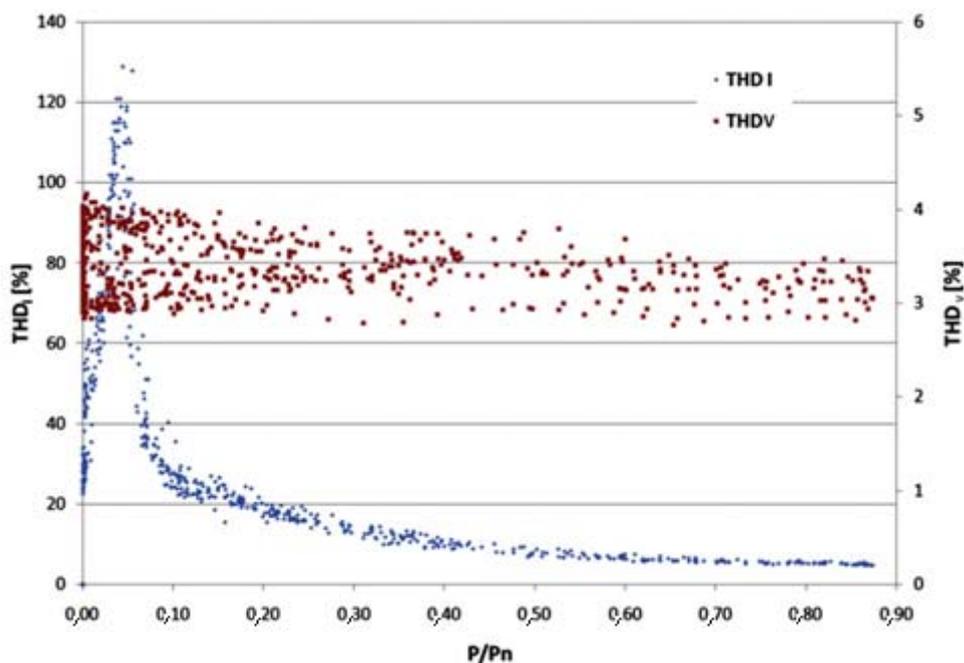


Figura 3.2 - Dispersão de THDi de tensão e corrente para condições de geração diferentes [Fekete et al., 2012].

O efeito de sombreamento ocorre quando um arranjo de painéis fotovoltaicos (ou parte dele) não é atingido por irradiação solar direta, como é o esperado, devido ao efeito de um obstáculo [Fekete et al., 2012.].

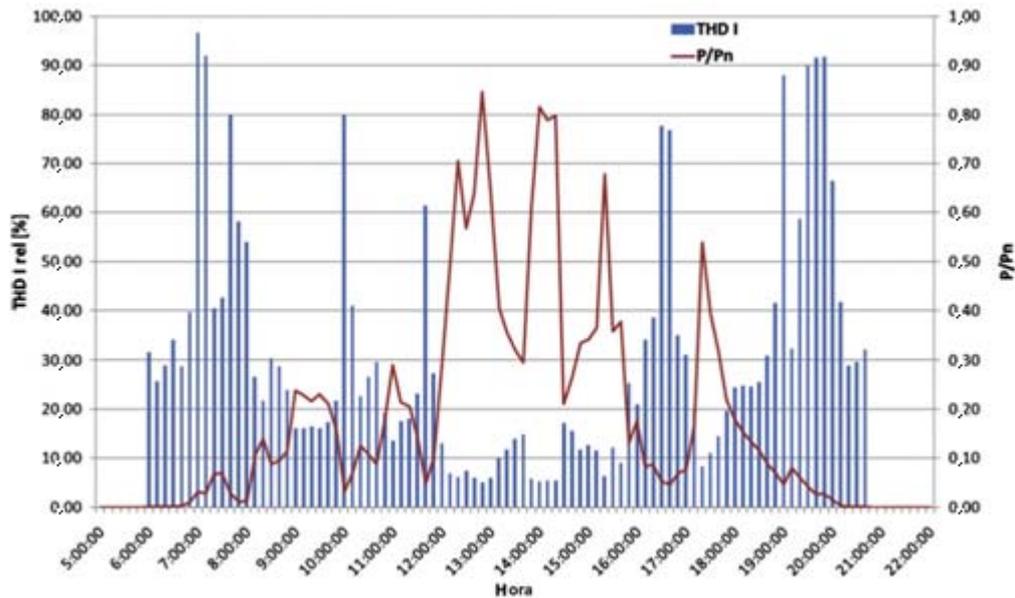


Figura 3.3 – Variação diária de um sistema geração de potência de um sistema FV e THDi para um dia médio de inverno na Croácia de acordo com Fekete et al., 2012.

Nos períodos de alta insolação, a distorção harmônica de corrente provocada pelos inversores do sistema fotovoltaico é baixa. Se o sistema estiver com pouca geração de energia, aliada a um conjunto significativo de cargas não lineares, a tendência é que o inversor se desconecte da rede, devido às condições impostas pelas premissas de anti-ilhamento.

3.4 Modelagem dos circuitos: inversores e redes elétricas

Os modelos utilizam como referencial da análise o ponto de conexão comum (PCC), também conhecido como ponto de acoplamento comum, ponto de entrada disponibilizado pela concessionária de energia para ligação de cargas de um consumidor de energia.

Nestas modelagens, a rede é representada por uma impedância constituída de resistência e reatância específicas, que são dados que as concessionárias de energia fornecem aos clientes, e as cargas usualmente são modeladas como sendo lineares.

A Tabela 3.3 mostra um exemplo de dado que corresponde a um ponto de uma determinada rede de distribuição atendida pela Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE), concessionária que atende a cidade de Porto Alegre, a qual estamos apresentando como exemplo, onde são fornecidas as impedâncias da rede (R_1 e a resistência de sequência positiva, X_1 é a reatância de sequência positiva, R_0 é a resistência de sequência zero e X_0 é a reatância de sequência zero).

Devido à grande utilização de dispositivos eletrônicos, que degradam a qualidade de energia da rede ao qual estão conectados, por apresentarem características não lineares, há a produção de respostas com frequências diferentes daquelas da rede elétrica.

Tabela 3.3 – Dados da rede elétrica da CEEE em um dado ponto da rede na cidade de Porto Alegre – subestação PAL 4, alimentador 459.

R_1 no ponto do AL	0,533 Ohm
X_1 no ponto do AL	1,593 Ohm
R_0 no ponto do AL	1,127 Ohm
X_0 no ponto do AL	4,207 Ohm

Em alguns modelos estudados, a rede utilizada na simulação não é apresentada, sendo apenas o inversor estudado [Badoud e Khemliche, 2011]. A Figura 3.4 apresenta um diagrama esquemático da proposta de Balathandayuthapani et al., 2011, para demonstrar um modelo de SFCR com rede e carga lineares.

Tanto a rede elétrica como a carga são representadas por cargas lineares, conforme Tabela 3.4.

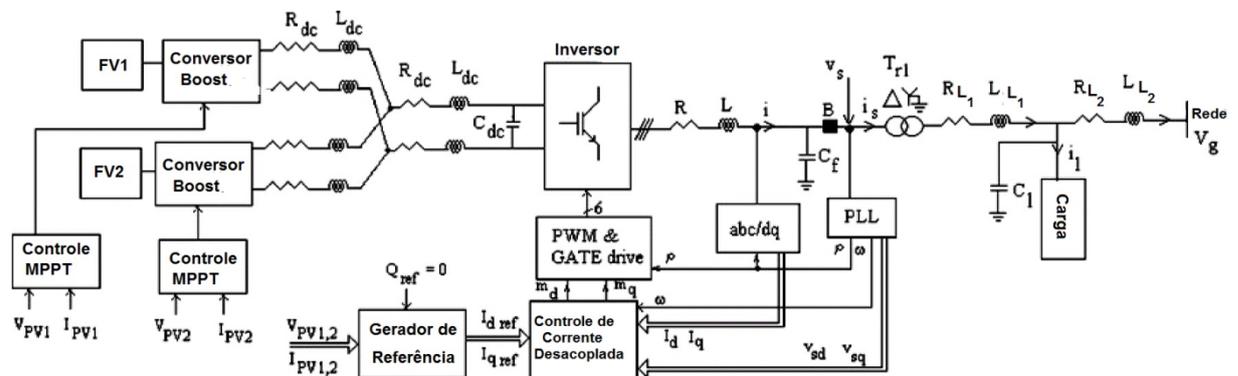


Figura 3.4- Proposta de Balathandayuthapani et al., 2011, para modelar um SFCR com rede e carga lineares.

Já Bialasiewicz, 2008, modelou um sistema composto por geradores: fotovoltaico, a diesel e eólico, conectados a uma linha e unidos no PCC, conforme mostrado na Figura 3.5.

Tabela 3.4 - Parâmetros do Sistema proposto por Balathandayuthapani et al., 2011, para SFCR com rede e carga lineares.

T _{r1} potência nominal	1,7 MVA
T _{r1} relação de tensões	6,6/0,48 kV
T _{r1} indutância mútua	0,1 pu
T _{r1} resistência	0,02 pu
Resistência da interface	3 mΩ
Indutância da interface	250 mH
Capacitância do filtro	600 μF
Frequência de chaveamento do inversor	3MHz
Resistência da barra DC	3 mΩ / unid. de comprimento
Indutância da barra DC	50 μH / unid. de comprimento
Comprimento da barra DC até o inversor	10 unid. de comprimento
Comp. da barra DC de <i>boost converter</i> ao ponto DC	2 unid. de comprimento
Voltagem da rede	6,6 kV rms
Indutância da linha	0,105 mH / unid. de comprimento
Resistência da linha	5 mΩ / unid. de comprimento
Comprimento da linha de transmissão	20 unid. de comprimento
Parâmetro da carga R-L	
Resistência	50 Ω
Indutância	10 mH
Retificador com diodo	
Resistência da carga	100 Ω
Indutância da carga	10 mH
Motor de indução	
Resistência do estator	0,8 Ω
Indutância do estator	4 mH
Resistência do rotor	0,8 Ω
Indutância do rotor	2 mH
Indutância de magnetização	70 mH
Inércia	0,1 J

Em sua proposta, o sistema pode ser configurado com os seguintes componentes: capacitor para correção do fator de potência (PFC), $R_L + jX_L$ – impedância da linha, VL - Carga de uma vila (*village*), DL – *Damp load* , gerador diesel, sistema de geração fotovoltaico e gerador eólico-turbina todos ligados ao PCC – ponto de acoplamento comum.

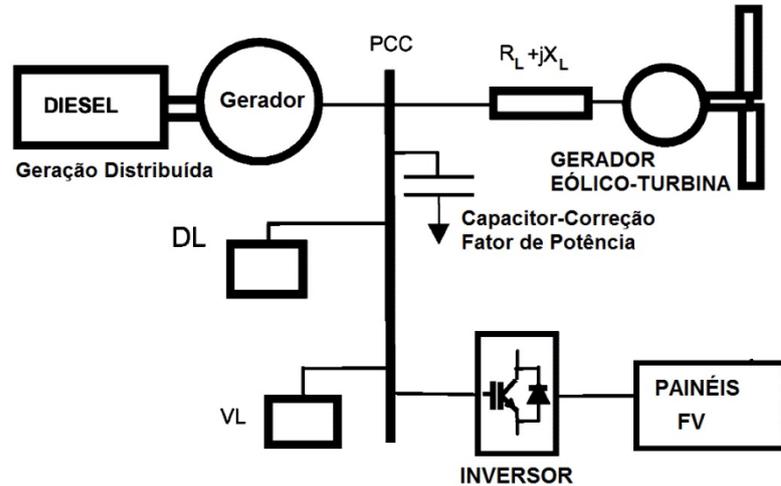


Figura 3.5- Proposta de Bialasiewicz, 2008, para análise do sistema.

O autor, observa que deve-se apresentar as cargas apenas como solicitação de potências. Nota-se, novamente, que os principais parâmetros utilizados são cargas lineares. Por sua vez, Dash e Kazerani, 2011, propõem um modelo no qual também há cargas lineares na modelagem, conforme Figura 3.6. Observa-se nesta figura que a rede é representada por uma impedância $R_L + jX_L$ e uma carga, não explicitando modelagem de cargas não lineares.

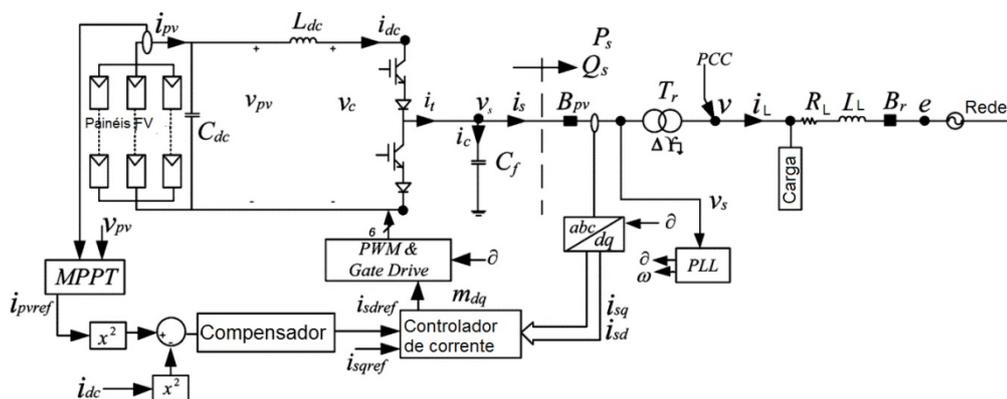


Figura 3.6- Proposta de Dash e Kazerani, 2011, para o sistema SFCR.

A proposta do controle do sistema FV conectado à rede de Chen et al., 2008, mostrado na Figura 3.7, prevê cargas não lineares em uma rede elétrica composta por uma impedância $R_L + jX_L$. De acordo com a estrutura apresentada, o sistema é simulado pelos autores nos programas de computador Matlab e Simulink com os parâmetros listados na Tabela 3.5.

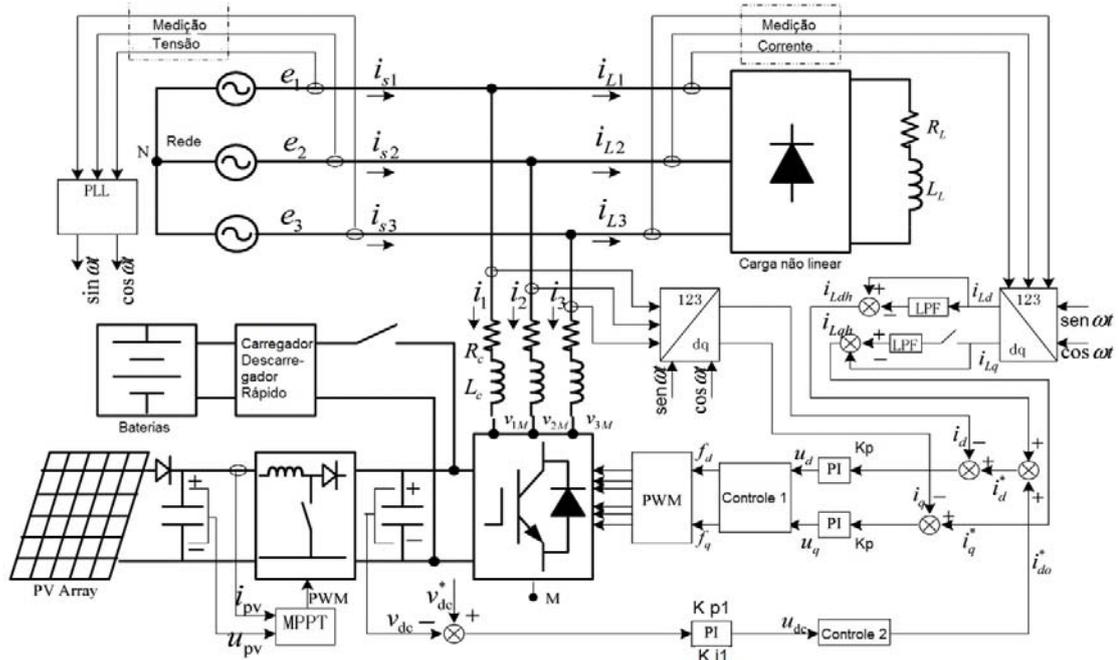


Figura 3.7 – Proposta de Chen et al., 2008, para simulação do sistema fotovoltaico.

Tabela 3.5 - Parâmetros de Simulação.

Rede:
$E = 220 \sqrt{2} \text{ V}$, $f = \omega / 2\pi = 50\text{Hz}$
$R_L = 100 \Omega$, $L_L = 1\text{mH}$; $L_C = 5,5 \text{ mH}$; $R_C = 0,1 \Omega$,
Sistema Fotovoltaico:
$I_{sc} = 12,75 \text{ A}$, $V_{OC} = 93,5 \text{ V}$ $I_m = 10,7\text{A}$, $v_m = 74,5\text{V}$
$C_{dc} = 1000\mu\text{F}$, $C_{pv} = 470\mu\text{F}$
$K_P = 89$, $K_i = 3000$; $K_{p1} = 0,056$; $K_{i1} = 4,68$

Fonte:Chen et al., 2008.

No sistema apresentado na Figura 3.7, a simulação foi realizada pelos autores a partir de cargas não lineares impostas através de formas de onda de corrente distorcidas. Observa-se na Figura 3.7 e na Tabela 3.5 que a carga (R_L e L_L) é representada como linear, a carga não linear é representada por uma forma de onda apenas, K_p é o coeficiente proporcional do compensador PI, K_i é o coeficiente integral do compensador junto a v_{dc} , K_{p1} é o coeficiente proporcional do compensador PI, K_{i1} é o coeficiente integral, junto a i_d e i_q .

O sistema fotovoltaico é projetado para manter tanto a potência ativa, quanto a potência reativa nos pontos de referência estabelecidos.

De acordo com os autores, combinam-se dispositivo de geração FV conectada à rede e filtro ativo paralelo, conforme mostrado na Figura 3.7. Este sistema unificado pode fornecer potência ativa, bem como compensar as correntes harmônicas e a potência reativa, quando o sol está disponível. Na irradiação fraca, ela tem a função de filtro *shunt* de energia ativa.

Além disso, o sistema é equipado com grande capacidade de baterias de armazenamento de modo que não só pode realizar geração fotovoltaica, como também a supressão de harmônicos, a compensação de potência reativa, a compensação de afundamentos ou ondulações de tensão e interrupção de energia instantaneamente.

Depois que o inversor converte a energia CC em CA a potência que é injetada na rede elétrica supre diretamente as cargas locais. Ao mesmo tempo, o sistema pode proporcionar uma compensação de tensão quando ocorre grandes afundamentos de tensão ou sobretensões, pois está equipado com dispositivo de grande capacidade de armazenamento neste caso.

O painel fotovoltaico conectado à rede, conforme mostrado na Figura 3.7, também aumenta a sua capacidade de compensação de potência [Chen et al., 2008].

Conforme o esquema proposto por Edrington et al., 2010, (Figura 3.8), o sistema é conectado através de duas linhas de transmissão, paralelas, representadas pelos conjuntos de resistências e indutâncias R_{L1} , R_{L2} , L_{L1} e L_{L2} , conectando-se à rede e à carga.

Não há referência quanto à linearidade da carga.

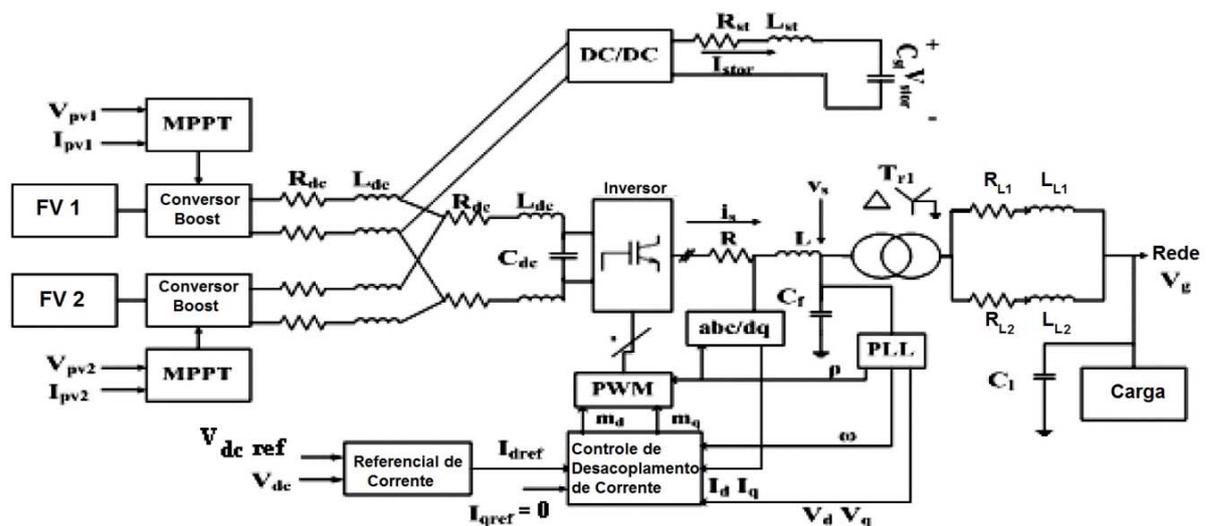


Figura 3.8 – Proposta de Edrington et al., 2010, para um sistema com múltiplos painéis fotovoltaicos, com sistema de armazenamento e conexão com a rede elétrica através de duas linhas de transmissão.

A Figura 3.9, apresenta o esquema de um sistema fotovoltaico proposto por Hamadi et al., 2011, no qual o sistema FV está conectado a uma rede, e, além desta, ainda há a alimentação de três tipos de carga: lineares trifásicas, não lineares monofásicas e não lineares trifásicas, sendo que estas duas últimas configuram-se como cargas não lineares desequilibradas.

Os autores referem que “uma técnica de controle não linear é usada para compensar o desbalanceamento das cargas e as cargas com conteúdos harmônicos”. A técnica proposta é baseada no cálculo da corrente de sequência positiva da carga. O conversor tem capacidade de compensar harmônicos de corrente, assim como as correntes desbalanceadas e as potências reativas junto às cargas [Hamadi et al., 2011].

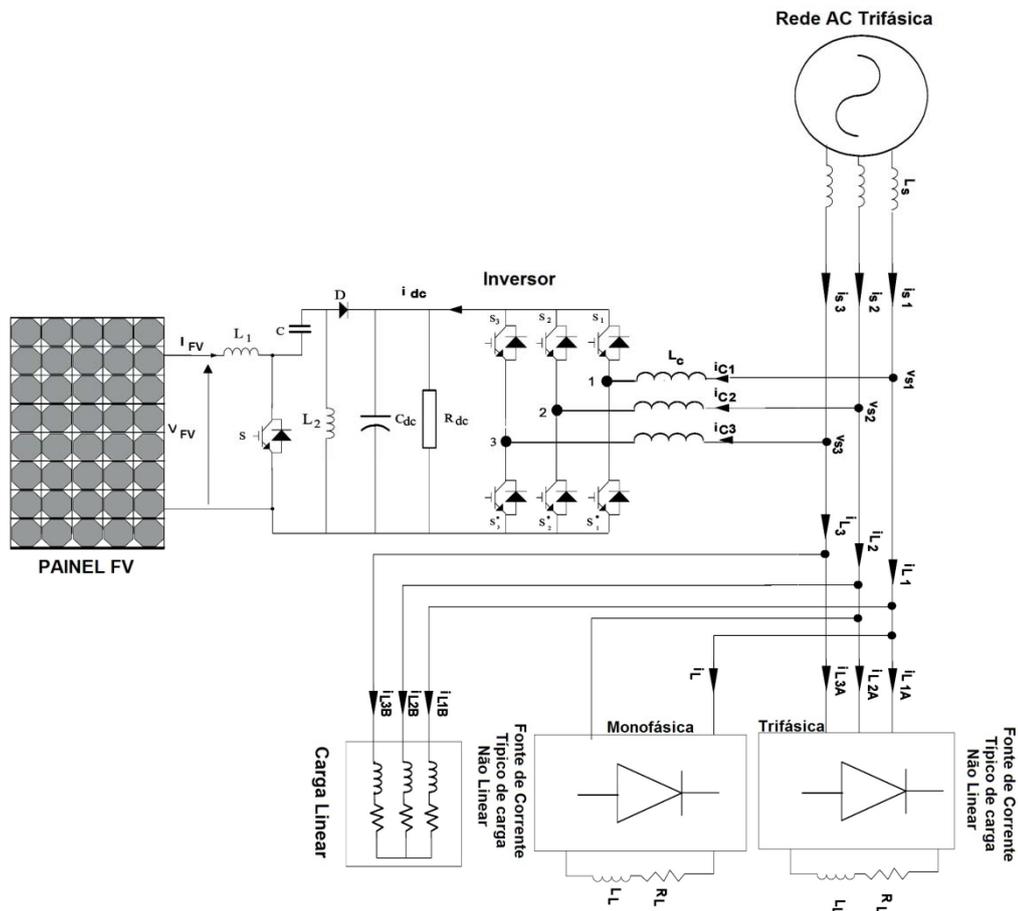


Figura 3.9 – Sistema proposto por Hamadi et al., 2011, no qual mostra cargas não lineares monofásicas e trifásicas conectadas à rede elétrica junto com cargas monofásicas.

Os parâmetros utilizados para simulação do circuito da Figura 3.9 estão representados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Parâmetros de simulação do Modelo de Hamadi et al.

Tensão da rede, e frequência	$V_s=70$ V (rms), $f_s=60$ Hz
Impedância da rede	$L_s=0,5$ mH, $R_s=0,1$ Ω
Carga linear	$L_L=10$ mH, $R_L=60$ Ω
Carga não linear tipo de fonte de corrente (trifásica)	$L_L=10$ mH, $R_L=15$ Ω
Carga não linear tipo de fonte de corrente (monofásica)	$L_L=10$ mH, $R_L=25$ Ω
Inversor (Reatâncias e Capacitância)	$L_c = L_n = 5$ mH, $C_{dc} = 3000$ μ F

As Figuras de 3.10 a 3.13, apresentam distorções provocadas pelos efeitos de cargas desbalanceadas e não lineares. Não é especificado como estas formas de onda são geradas, nem quais os parâmetros que levaram o autor a determinar os valores de impedância para os dois tipos de cargas não lineares apresentados na Tabela 3.6.

É bastante importante que se tenha idéia do que representam estas impedâncias para que, através de suas variações, que devem representar algum tipo de carga não linear, uma vez que está representada por uma fonte de corrente não linear em paralelo com a impedância, possa se ter uma idéia de como se comportará o sistema como um todo.

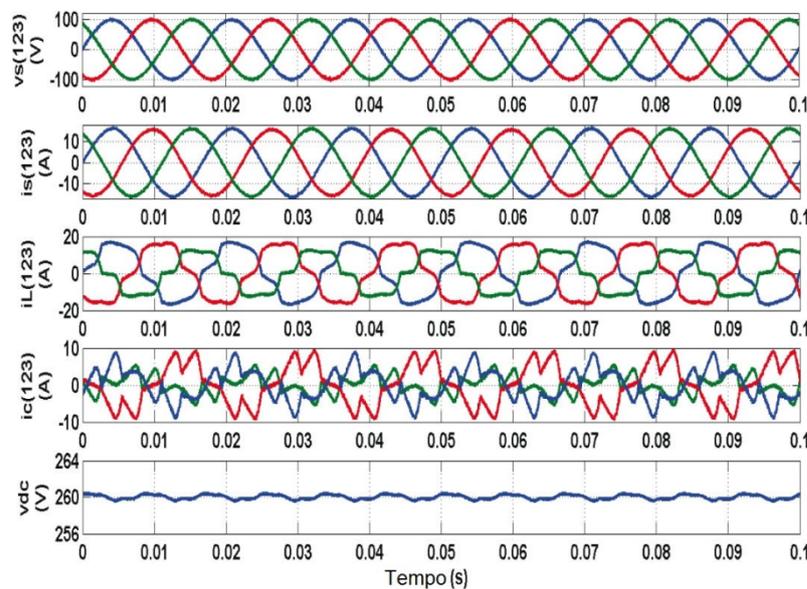


Figura 3.10 – Tensões e correntes de estado estacionário do sistema representado na Figura 3.9, em desequilíbrio de carga sem o sistema fotovoltaico, segundo simulação [Hamadi et al., 2011].

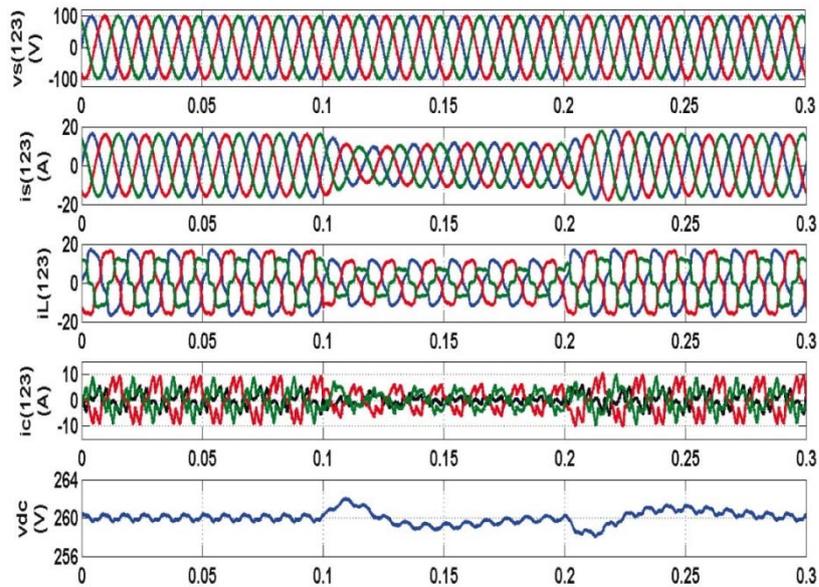


Figura 3.11 – Resposta dinâmica do sistema representado na Figura 3.9, durante variação súbita de carga desequilibrada sem o sistema fotovoltaico [Hamadi et al., 2011].

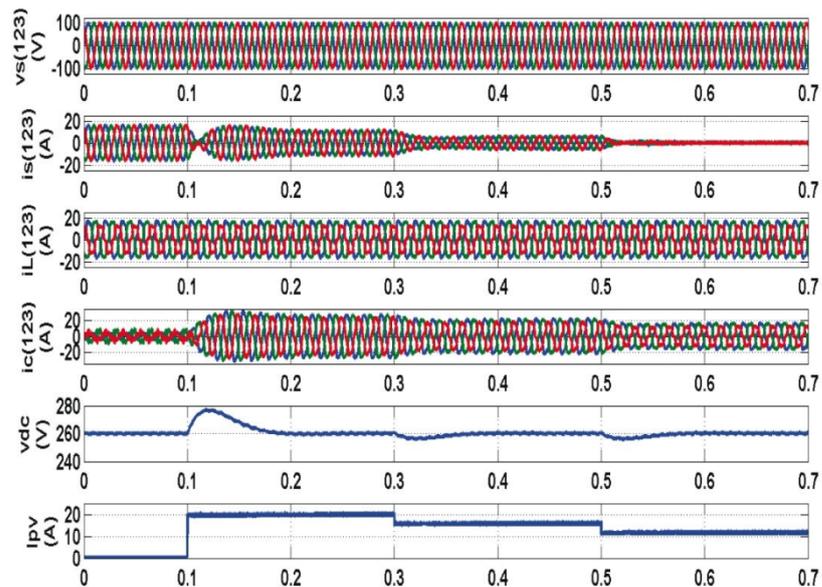


Figura 3.12 – Resposta dinâmica do sistema com carga desequilibrada segundo Figura 3.9 e sistema fotovoltaico sob diferentes variações de irradiação [Hamadi et al., 2011].

Wu e Tao, 2009, apresentam um sistema FV ligado a um sistema de distribuição de energia, composto por diversas barras interconectadas através de diversas linhas representadas pelas suas impedâncias conforme mostrado na Figura 3.14.

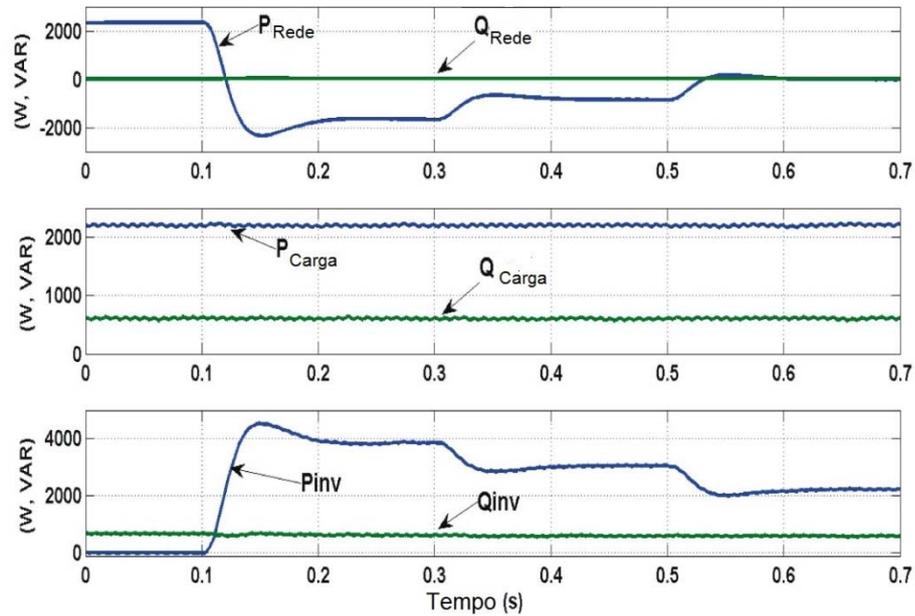


Figura 3.13 – Análise do fluxo de potência do sistema com diferentes irradiâncias do sistema fotovoltaico com carga desequilibrada segundo Figura 3.9 [Hamadi et al., 2011].

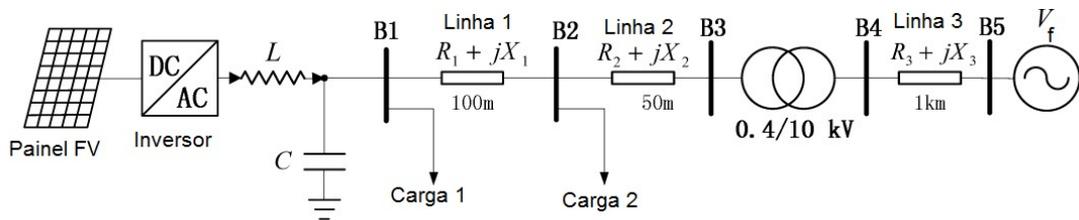


Figura 3.14 – Diagrama unifilar do sistema proposto por Wu e Tao, 2009, conectado a um sistema de distribuição trifásico de energia.

A tabela 3.7 apresenta os dados da rede de distribuição e a tabela 3.8, os dados das cargas conectadas às barras B1 e B2.

Tabela 3.7- Parâmetros do sistema de distribuição do circuito mostrado na Figura 3.14 [Wu e Tao, 2009].

Barra	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Distância
B1 - B2	0,641	0,101	100m
B2 - B3	0,641	0,101	50m
B4 - B5	0,347	0,234	1km

Tabela 3.8- Parâmetros das cargas ligadas às barras B1 e B2 do circuito mostrado na Figura 3.14 [Wu e Tao, 2009].

Barra	P (kW)	Q (kVar)
B1	6	0
B2	6	1.5

Novamente, fica demonstrado que as cargas representadas também nesse trabalho são cargas lineares.

Conforme colocado anteriormente, uma perturbação grande no sistema poderia temporariamente perturbar a tensão vista pelo sistema gerador fotovoltaico. Muitas vezes, dependendo do projeto do inversor, o controlador que faz a interface da(s) unidade(s) do SFSCR com a rede de distribuição pode não ser capaz de lidar com esta perturbação. Conseqüentemente, eles podem falhar e provocar o desligamento do inversor, e assim, o sistema fotovoltaico da rede [Tan e Kirschen, 2007].

Papaioannou et al., 2011, mostram em seu trabalho um sistema fotovoltaico ligado a um transformador 150-kVA, 20/0,4 kV e conectado a uma linha de distribuição aérea com 300m de comprimento e com os seguintes parâmetros: $R_1=1,268$ Ohms/km e $X_1= 0,422$ Ohms /km conforme mostrado na Figura 3.15 [Papaioannou et al., 2011].

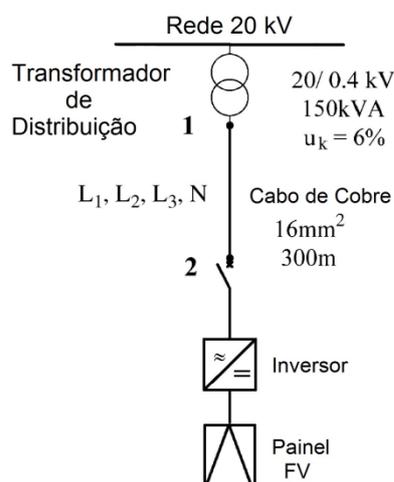


Figura 3.15 – Sistema proposto por Papaioannou et al., 2011, mostrando um sistema FV conectado a um sistema de distribuição de energia.

A Figura 3.16 representa uma curva diária da onda fundamental de corrente e das demais componentes harmônicas na saída de um dos três conversores DC-AC idênticos com o sistema fotovoltaico conectado. A corrente de 3ª harmônica apresenta picos intensos durante o

amanhecer e o pôr do sol, atingindo aproximadamente 40-50% da amplitude da fundamental de corrente.

A fim de validar o modelo corretamente, a rede onde a usina FV está ligada também deve ser modelada. Este modelo simulado, por Papaioannou et al., 2011, foi feito com os dados adquiridos a partir de medição realizada. A tensão do secundário do transformador é simulada como uma fonte de tensão. Os harmônicos de ordem 5ª e 7ª de tensão foram registradas quando a planta FV não produziu energia ou quando a mesma foi desligada. Estes harmônicos, que representam a base do conteúdo harmônico, são simuladas com fontes de tensão, cujas frequências correspondem a ordem de 5ª e 7ª.

A sua amplitude é determinada através de testes e da triagem destes, a fim de dar o mesmos valores da tensão no PCC, tais como os coletados na medição com os interruptores do sistema fotovoltaico desligados.

Por fim, quando o sistema FV é desconectado, sem demanda de carga no alimentador de baixa tensão (BT), foram realizadas as gravações no mesmo, o que significa que a planta FV é ligada e instalada apenas na linha, sem estar conectada ao sistema de distribuição

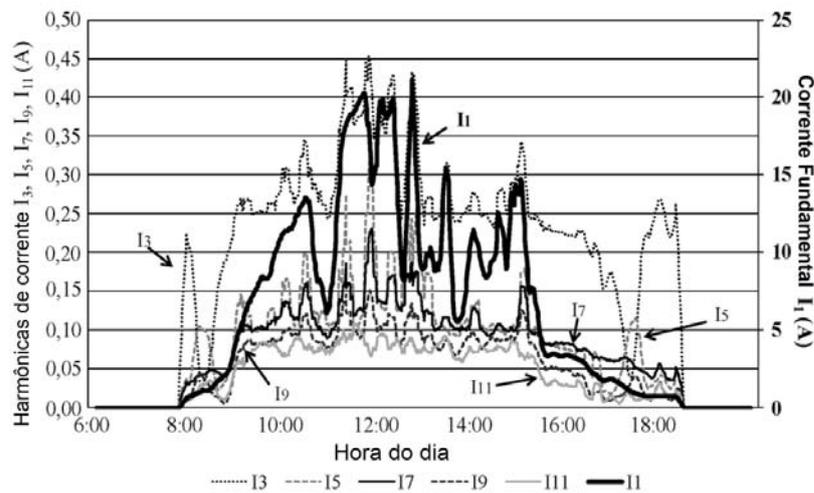


Figura 3.16 – Corrente fundamental e harmônicas de ordem superior 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª medidos em uma linha em um dia com o sistema FV ligado à rede [Papaioannou et al., 2011].

A Figura 3.17 representa modelo simulado da rede, com o sistema FV conectado à ela, formando um sub-circuito. Esta é uma modelagem de tensão distorcida da rede [Papaioannou et al., 2011].

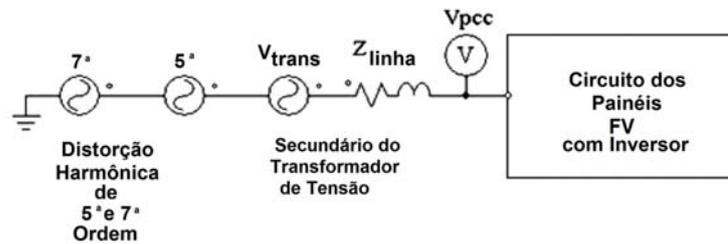


Figura 3.17 – Modelo utilizado para simular, por Papaioannou et al., 2011, a validação dos resultados de acordo com as medidas realizadas.

De acordo com Viet e Yokoyama, 2010, um sistema fotovoltaico pode ser representado por duas partes principais: o controle de potência e o inversor utilizando a fonte de tensão PWM (*pulse width modulation*), conforme mostrado na Figura 3.18 a seguir.

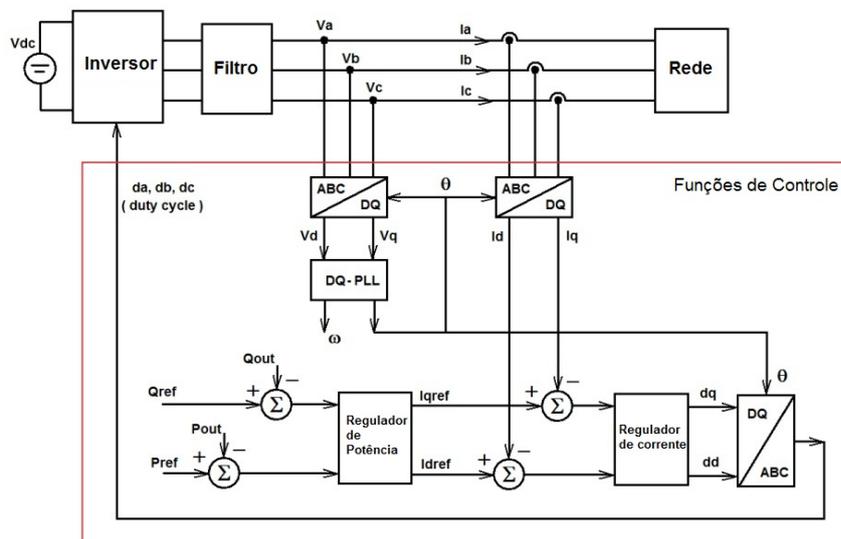


Figura 3.18 – Modelo utilizado por Viet e Yokoyama, 2010, a mostrando o sistema FV conectado à rede.

Nota-se que na proposição acima, a rede está simplesmente modelada como um bloco [Viet e Yokoyama, 2010].

O sistema de geração fotovoltaica conectado à rede opera durante o dia e pára durante a noite. Isso afeta a estabilidade do sistema de energia e a utilização de equipamentos, pois o sistema se desconecta no horário de pico, ou seja, no final da tarde, quando a insolação diminui muito, e neste período é o que há a maior solicitação de carga para a rede de distribuição de energia das concessionárias. Portanto, a fim de aumentar a utilização, o sistema FV pode ser também concebido para proporcionar a função de gerência da qualidade de energia [Chen et al., 2008].

De acordo com Lei et al., 2011, além da flutuação de tensão da rede, os harmônicos, a assimetria, flicker, e outros problemas de qualidade de energia também podem aparecer em sistemas fotovoltaicos. As características não-ideais de fonte de tensão da rede também têm um impacto negativo sobre o funcionamento dos inversores em operação paralela em usinas fotovoltaicas de grande capacidade [Lei et al., 2011].

A distorção originada a partir de sistemas fotovoltaicos conectadas no PCC com a rede de BT ou MT, depende também das características combinadas de harmônicas do sistema de distribuição, onde o sistema fotovoltaico está instalado, e do desempenho da rede elétrica da concessionária.

Na prática, há contribuições substanciais das harmônicas de baixa ordem (principalmente as de ordem 3^a, 5^a e 7^a) nas harmônicas de corrente injetadas na rede.

As contribuições para a distorção harmônica são cada vez mais importantes em níveis de geração de baixa potência (por exemplo, para a energia gerada abaixo de aproximadamente 20% da potência nominal) [Chicco et al., 2009].

Como pode-se ver pela Figura 3.19, a forma da THDi é caracterizada por um valor comparativamente elevado sob condições de geração de potência baixa, com um decaimento acentuado quando a geração é elevada, permanecendo a THDi abaixo de 10% quando a carga do inversor excede a faixa entre 18% e 20% da potência nominal. As correntes harmônicas individuais apresentam um comportamento similar, especialmente para harmônicas de baixa ordem, conforme Figura 3.20 [Chicco et al., 2009].

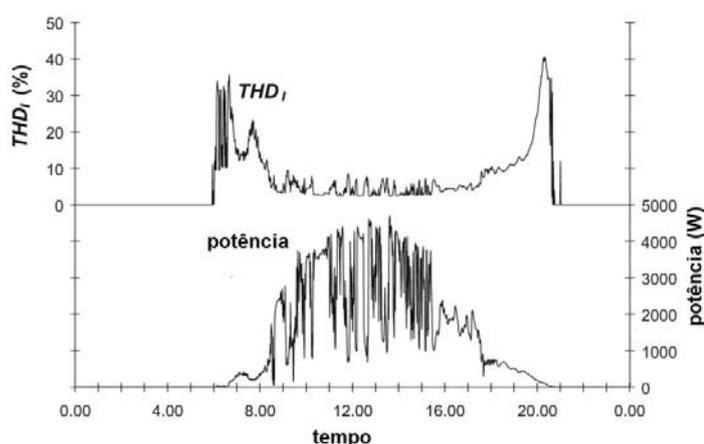


Figura 3.19 – Registro gráfico que demonstra na parte superior a distorção harmônica gerada e injetada na rede por um sistema fotovoltaico de 5kW em comparação com a potência produzida pelo mesmo sistema durante um determinado dia de operação [Chicco et al., 2009].

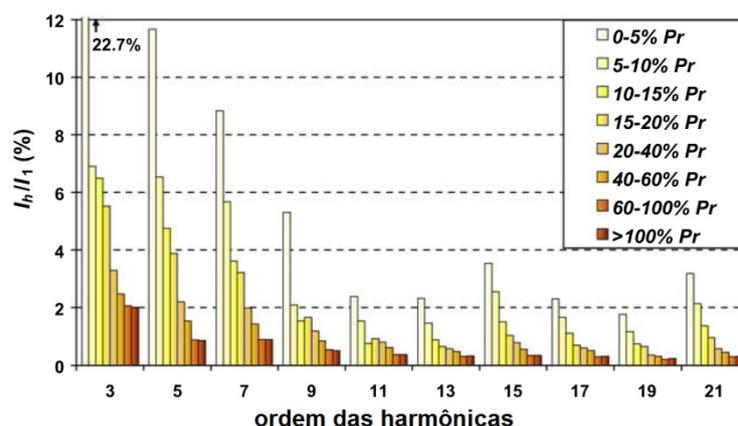


Figura 3.20 – Valores relativos a 95% do conteúdo harmônico de corrente de um inversor CA de 5kW para diferentes condições de carga medidos durante 4 dias - 3ª harmônica truncada [Chicco et al., 2009].

A maximização da eletricidade produzida a partir de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e do cumprimento dos requisitos de qualidade para a eletricidade injetada justificam os esforços crescentes para o planejamento global dos sistemas conectados à rede pública.

Para sistemas maiores, inversores trifásicos são normalmente utilizados. O diagrama de blocos do sistema trifásico conectado a rede proposto por Rey-Boué et al., 2012, é ilustrado na Figura 3.21.

A ligação à rede é regulada por normas elétricas, que estabelecem os parâmetros técnicos que o sistema fotovoltaico, através de sua saída em corrente alternada, deve realizar. A alimentação CA fornecida para a rede deve manter um nível mínimo de qualidade, ou seja, evitar a injeção de potência reativa e harmônicas.

As mudanças de tensão e corrente são esperadas para o lado CC do inversor, principalmente devido às mudanças com a radiação solar e temperatura. Os dispositivos fotovoltaicos apresentam uma característica não-linear da curva de corrente-tensão ($I \times V$). Assim, para cada radiação solar e condições de temperatura existe uma carga de trabalho ótima que conduz para extrair o máximo de energia a partir dos dispositivos de FV [Rey-Boué et al., 2012].

Pelo ponto de vista do lado CA, o PCC dependerá de algumas restrições: 1) A distorção harmônica para a corrente de rede; 2) O fator de potência da ligação inversor – rede; 3) O sistema de detecção do ilhamento; 4) A compatibilidade electromagnética; 5) O isolamento galvânico (entre parte CC e CA, através de um transformador) por questões de

segurança; 6) As características da rede trifásica pública na qual o inversor está conectado, tais como a tensão e frequência nominal, distorções harmônicas, desequilíbrios, falhas (curto-circuito, sobretensões).

À medida que as correntes harmônicas também dependem das tensões harmônicas prevaletentes no sistema de CA (rede), as medições em condições normais de ensaio geralmente proporcionam correntes harmônicas mais baixas do que aquelas produzidas pelo inversor em condições reais de operação [Rey-Boué et al., 2012].

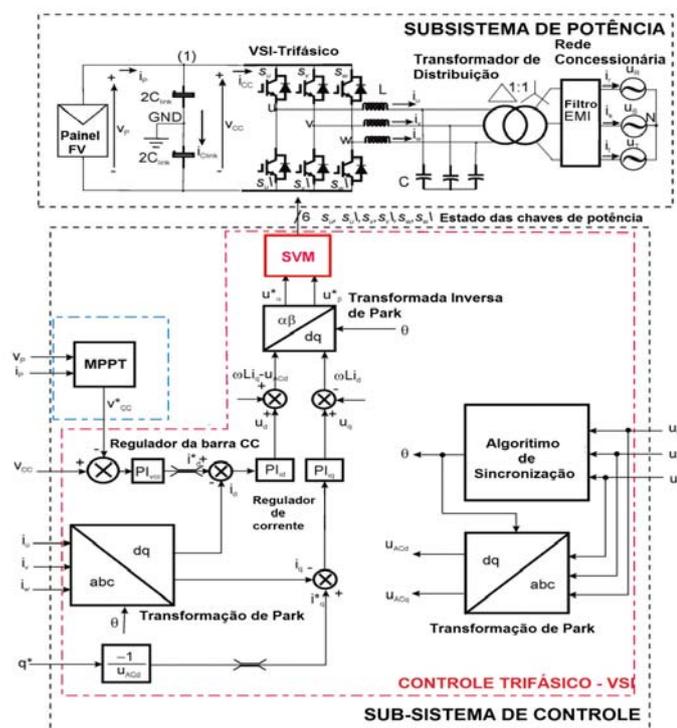


Figura 3.21 - Diagrama de blocos do sistema de trifásico conectado a rede proposto por Rey-Boué et al., 2012.

Não menos importante que os aspectos anteriormente mencionados, o tipo de carga ligada à rede pública ao qual o inversor está ligado também determina o mau funcionamento do inversor [Urbanetz Junior, 2010].

Salienta-se que há uma grande influência dos parâmetros elétricos da rede ao qual o inversor está conectado, em seu sistema de controle, para as decisões de controle possam funcionar corretamente.

Como as cargas não lineares deformam consideravelmente as formas de onda tanto de tensão como de corrente, o objetivo no próximo capítulo é descrever estas cargas não lineares

de maneira que possam ser modeladas para serem utilizadas em simulação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

4 MODELAGEM PROPOSTA E RESULTADOS ALCANÇADOS

4.1 Descrição da modelagem usualmente utilizada

Como descrito no capítulo anterior, na maioria dos artigos e trabalhos pesquisados, a rede elétrica é apresentada como uma fonte de tensão ligada a uma linha elétrica que conecta esta fonte à carga, representada por uma impedância (R_L e X_L).

Também são atribuídas impedâncias lineares para as cargas elétricas conectadas a esta rede, representadas por uma única impedância (R_C e X_C) na maioria dos trabalhos pesquisados. Tal representação encontra-se na da Figura 4.1.

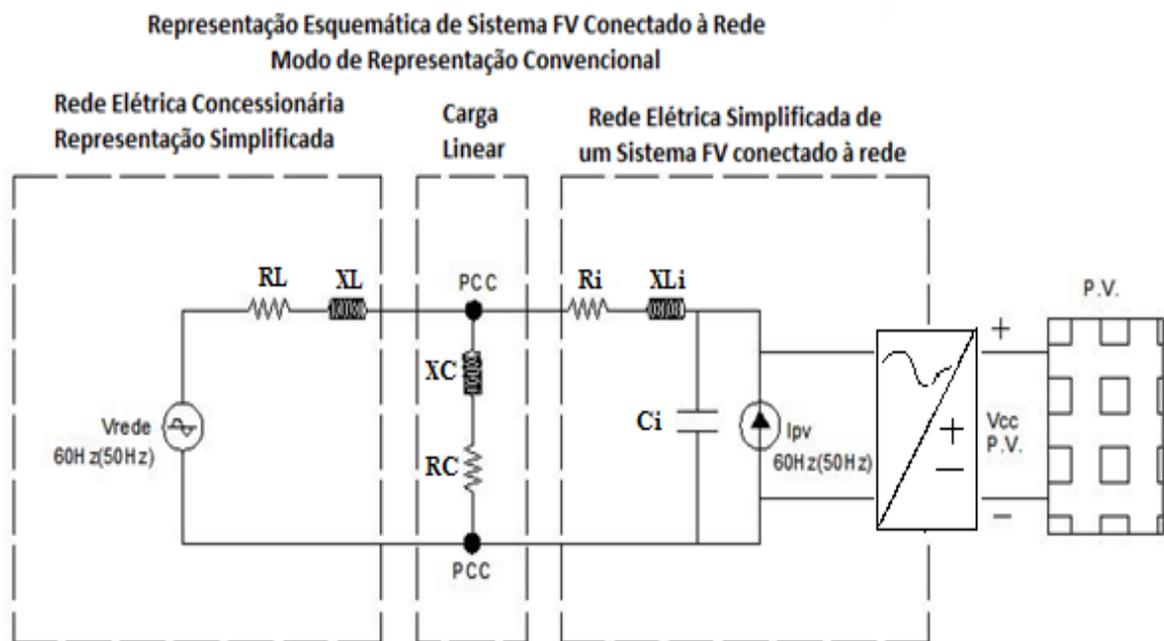


Figura 4.1 – Representação de um sistema monofásico composto por gerador FV e a rede elétrica da concessionária e da carga linear utilizada em simulações.

A modelagem normalmente encontrada nos trabalhos pesquisados, para a simulação de inversores, é composta por impedâncias que representam a rede e também a carga, não levando em conta o efeito deste problema gerado pelas cargas não lineares.

4.2 Descrição da modelagem proposta

Na presente dissertação é proposta a modelagem de um sistema constituído dos seguintes componentes: uma rede elétrica, um gerador fotovoltaico com inversor e cargas lineares e não lineares, conforme mostrado na Figura 4.2.

A aquisição dos dados necessários para a modelagem foi realizada através da utilização de um analisador de qualidade de energia da marca Fluke, modelo 435. Foram realizadas medidas de tensão, corrente, distorção harmônica de tensão e de corrente, potência ativa e reativa e fator de potência, de maneira que se tivesse todos os dados necessários para a implementação matemática do modelo.

Através destes dados, consegue-se separar o conteúdo harmônico da corrente e da tensão, bem como a frequência da rede no momento e o fator de potência do equipamento que está sendo medido.

Com isso cada um dos equipamentos será representado por fontes de corrente. A Figura 4.2 representa o sistema FV do lado direito, a rede da concessionária no lado esquerdo e no centro, as fontes de corrente em paralelo, representando o equipamento a ser modelado.

Nos modelos utilizados para a simulação de sistemas FV com inversores para a ligação com a rede, pressupõe-se que o parâmetro que não varia é a fonte de alimentação da rede da concessionária no momento da realização da medição.

Para tanto, foi fixada a tensão de 127V como o nível da fonte utilizada no modelo proposto, pois a mesma representa a tensão fase-neutro do sistema elétrico da rede de baixa tensão de Porto Alegre, que é a tensão do sistema utilizado nesta cidade. A ligação do transformador na parte de baixa tensão, na cidade de Porto Alegre, para as redes de distribuição de energia, corresponde a uma ligação com neutro aterrado, na qual estão ligadas as cargas (lineares e não lineares) e onde também estaria conectado o sistema FV .

A tensão da rede (fonte) que será implementada no modelo, foi medida sem nenhuma carga, para que este valor fosse implementado na modelagem.

A partir destes dados será iniciada a parte experimental desta dissertação.

4.3 Modelagem do conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes

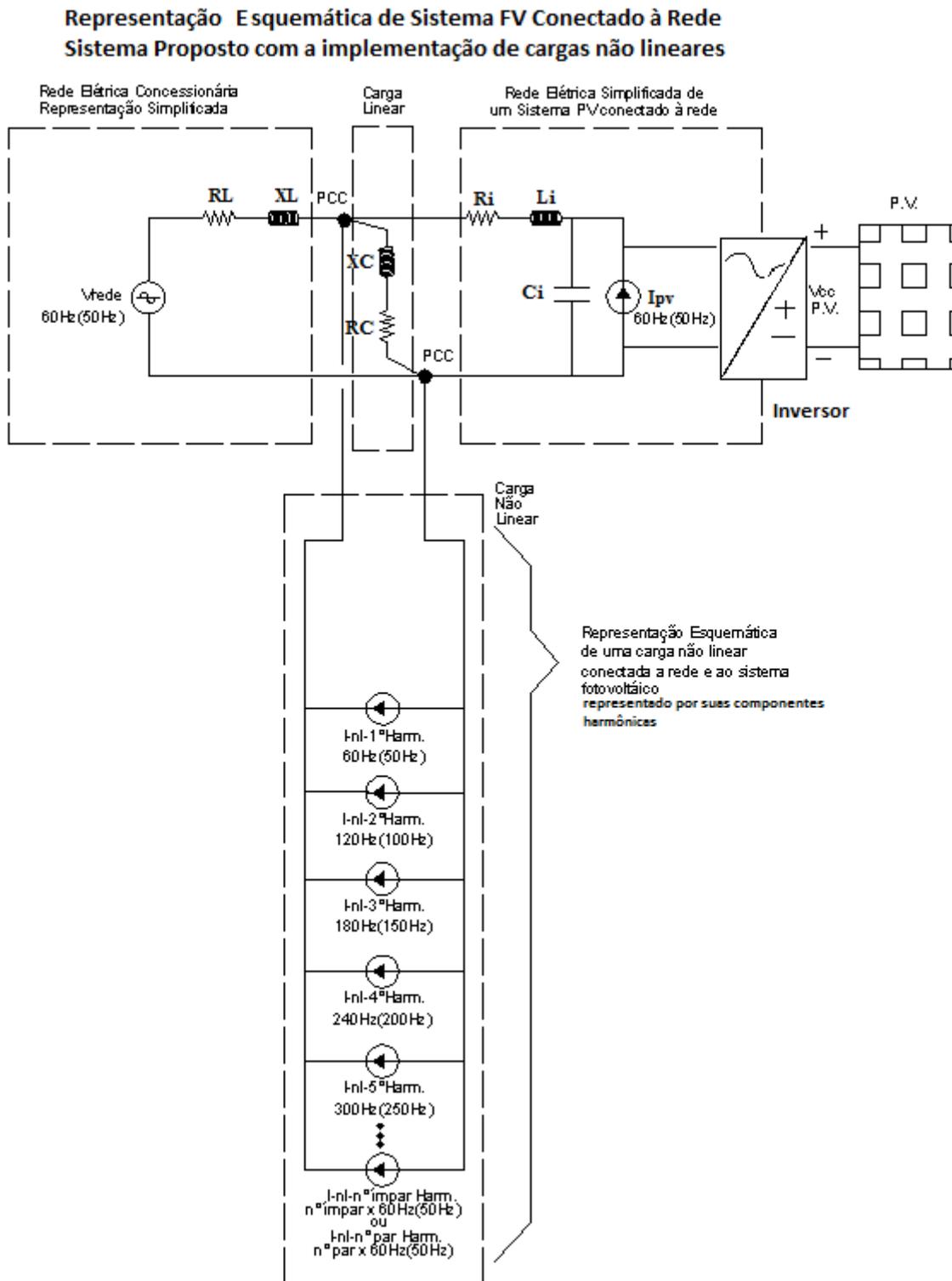


Figura 4.2 – Representação de um sistema composto por gerador FV, da rede elétrica da concessionária de carga linear e não linear.

Foi utilizada para medição uma garra de corrente no analisador de qualidade de energia Fluke 435 de 40 Ampéres de corrente máxima. Foram executadas as medições no conjunto reator eletrônico 2 x 32W e lâmpadas fluorescentes tubulares de 32W, conforme Figura 4.3. A Figura 4.4.a representa graficamente os valores apresentados na Figura 4.3.b., cujo objetivo é demonstrar o comportamento da distorção harmônica desta carga não linear.

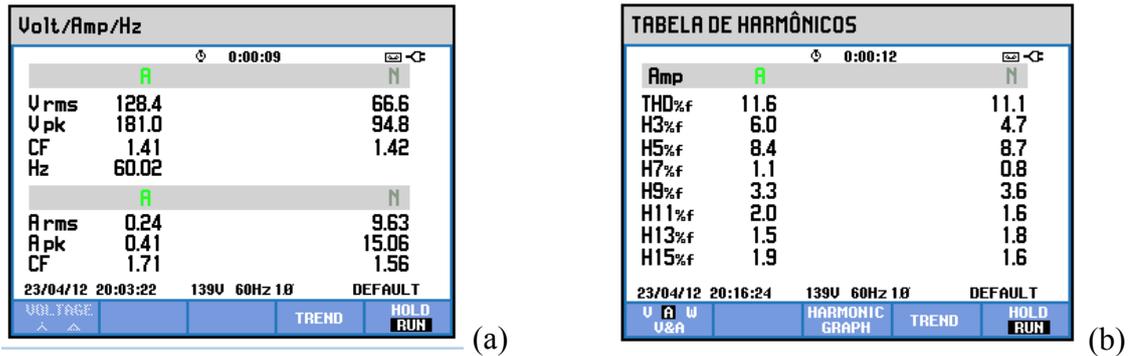


Figura 4.3 – Em (a) Valores instantâneos de tensão da rede e corrente no conjunto e em (b) Distorção harmônica de corrente percentual no conjunto reator + lâmpadas.

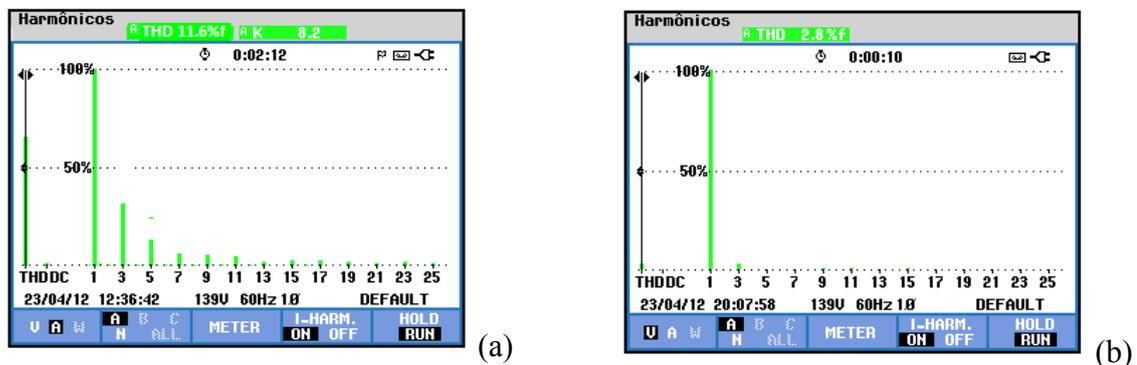


Figura 4.4 – Distorção Harmônica do conjunto reator eletrônico + 2 lâmpadas fluorescentes de 32W ligadas em 128,4V (RMS), (a) Distorção de Corrente em (b) Distorção de tensão.

A Figura 4.4-b apresenta a distorção harmônica total de tensão (THDV) da rede a qual o conjunto reator eletrônico + lâmpadas está conectado, e por representar a rede da concessionária, praticamente não apresenta distorção, como foi suposto inicialmente no modelo.

Baseado nisto, pode-se manter o raciocínio de modelagem da carga como fontes de corrente em paralelo com a rede.

Observa-se também pela Figura 4.3-a que a tensão da fonte é de 128,4 V RMS e 181,0 V de pico, e a frequência é de 60,02 Hz, que é a frequência fundamental de nosso sistema

(harmônica de primeira ordem ou fundamental). Será considerada a frequência de 60Hz e tensão de 127 V (RMS) e 179,6 V de pico, na modelagem. Como se pode verificar na Figura 4.3-b, este equipamento gera para a rede conteúdo harmônico de corrente que é denominada de distorção harmônica total de corrente (THDI).

Com base no espectro de harmônicas da Figura 4.3-b é que será iniciada a modelagem da carga.

Através das medições, tem-se como dados de entrada para a modelagem, a corrente total drenada por este dispositivo da rede elétrica, que é de 0,41 Ampère de pico (0,24 A RMS) (Figura 4.3-a), e a distribuição espectral dos harmônicos desta mesma corrente, que é representada pela Figura 4.3-b.

4.3.1 Equacionamento matemático para a carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes

De acordo com o sistema proposto representado na Figura 4.2, uma parcela da carga não linear será representada por uma soma constituída das amplitudes de corrente proporcionais ao espectro de harmônicas gerados em cada uma das frequências lidas pelo medidor Fluke, para que seja reproduzido o mesmo efeito descrito anteriormente, de acordo com a série de Fourier mostrada na Equação 2.2.

Como dito em 2.1.5.2 , os retificadores trifásicos de 6 pulsos apresentam apenas harmônicas de ordem ímpar, devido a simetria de implementação do circuito, assim como praticamente todas as fontes que alimentam circuitos eletrônicos, onde se pode comparar com as medições realizadas e isto está mostrado na Figura 4.4- que esta afirmação é válida, pois o espectro de harmônicas de corrente são de ordem ímpar.

Portanto, o conjunto de iluminação composto pelo reator eletrônico mais as duas lâmpadas de 32W será representado como um conjunto de fontes de corrente de frequências ímpares, ligadas em paralelo, sendo utilizados os dados obtidos através da medição dos harmônicos.

De acordo com as medições realizadas e representadas pelas Figuras 4.3-a e 4.3-b, em que a primeira figura apresenta a corrente total e a segunda apresenta o conteúdo harmônico da corrente, e substituindo os valores na equação 4.1, a representação das fontes de corrente será dada por:

$$I_{32W} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.1.

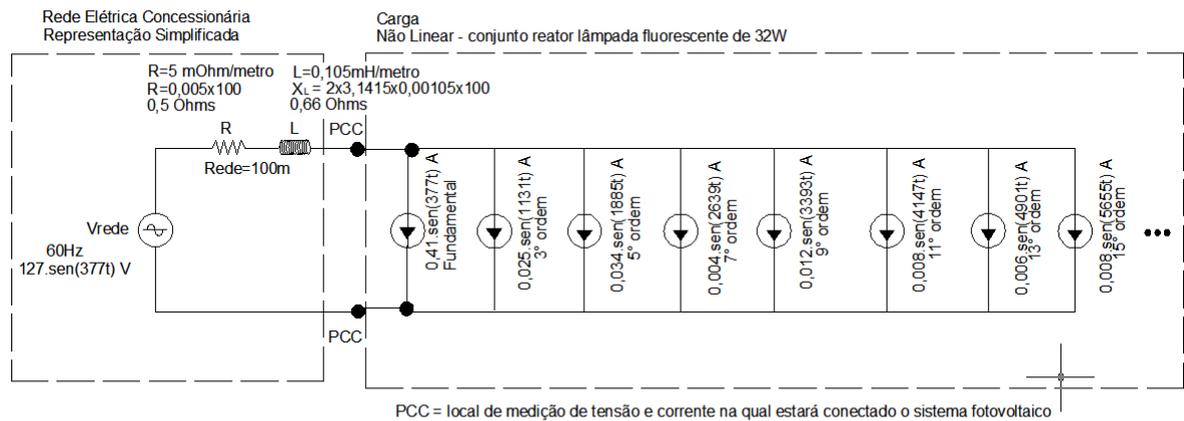
n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
I ₁ = 0,41	I ₃ = 0,025	I ₅ = 0,034	I ₇ = 0,004	I ₉ = 0,012	I ₁₁ = 0,008	I ₁₃ = 0,006	I ₁₅ = 0,008
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

4.3.2 Simulação computacional do modelo: carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes

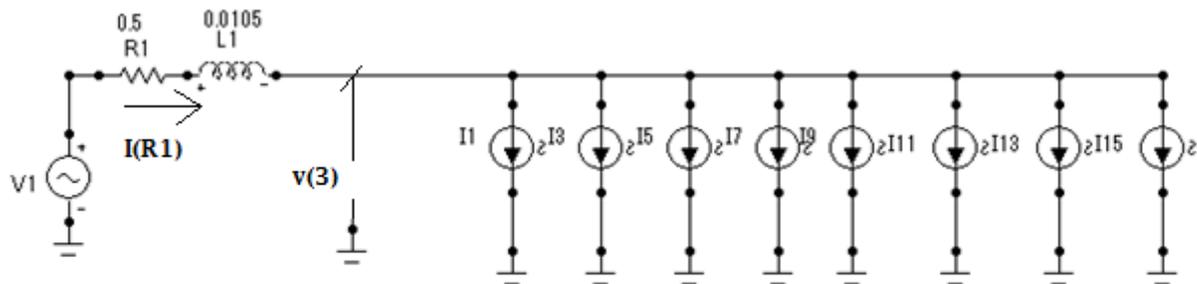
Utilizando-se do programa de computador da empresa Spectrum Software, denominado de Microcap versão 7.0 - 2002, que é um software de simulação de circuitos eletrônicos, que será utilizado para a verificação desta representação cujo desenvolvimento é baseado nas premissas eu seguem:

- 1- para a modelagem e simulação, a rede elétrica é monofásica, senoidal de 127 Volts (RMS) ou 179,6 V de pico (amplitude);
- 2- a linha, escolhida arbitrariamente como sendo de comprimento 100m, é representada por cabos elétricos com uma impedância composta por uma resistência de 0,5 Ohms e uma reatância indutiva de 0,66 Ohms (em um caso real, estes valores podem ser obtidos na concessionária de energia);
- 3- a carga não linear (reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes de 32W) é representada pelas fontes de corrente mostradas na Figura 4.5, que são expressas através da equação 4.1.

As duas formas de onda apresentadas na Figura 4.6, são respectivamente, V3 que é a tensão da fonte e IR1 que é a corrente que a carga drena da fonte de alimentação. Para esta simulação determina-se uma onda senoidal de amplitude 179,6 V



a



b

Figura 4.5 – Circuito equivalente da rede elétrica a qual está conectada uma carga não linear composta pelo conjunto reator eletrônico mais duas lâmpadas fluorescentes de 32W utilizado para a simulação utilizado para a segunda simulação em (a) circuito proposto e em (b) circuito implementado no programa Microcap.

Se for comparada a corrente IR_1 simulada com a corrente medida realizada com o analisador Fluke 435, mostrada na Figura 4.6, pode ser visto que a onda gerada através da simulação, é bastante semelhante à corrente medida, mostrada na Figura 4.7.

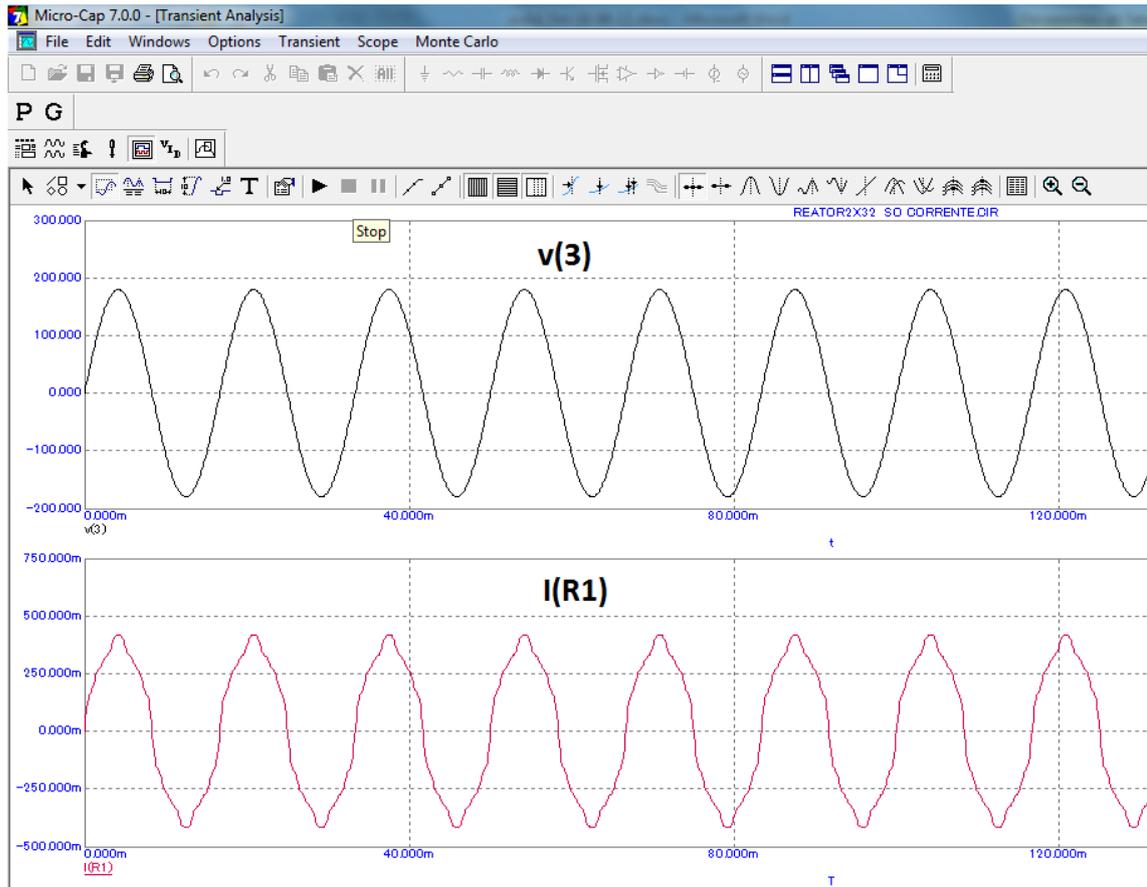


Figura 4.6 – Simulação Microcap do conjunto reator + lâmpadas no ponto PCC mostrado na Figura 4.5 onde $I(R1)$ é a corrente drenada do sistema.

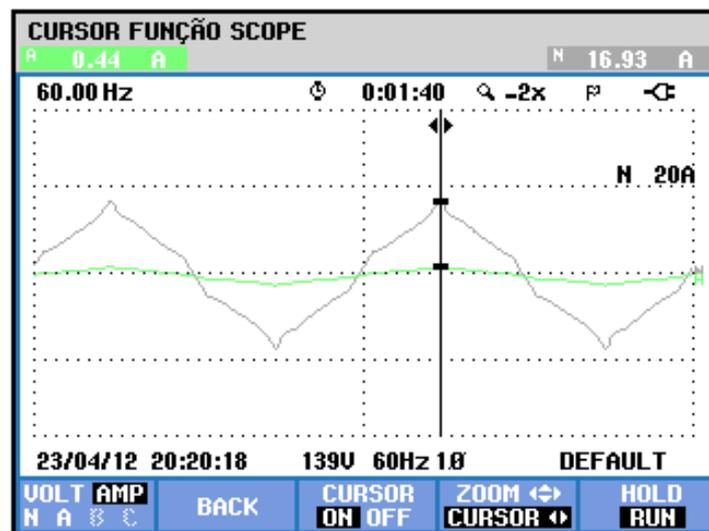


Figura 4.7 – Forma de onda medida com o analisador Fluke 435 no conjunto reator e duas lâmpadas de 32W na rede 181,0 V de pico (128 V –RMS).

4.4 Modelagem do microcomputador

Para a medição do dispositivo microcomputador também foi utilizada uma garra de medição de corrente no analisador Fluke 435 de 40 Ampères.

A mesma metodologia que foi utilizada para realizar as medições no conjunto reator eletrônico e duas lâmpadas fluorescentes de 32W foi utilizada para realizá-las no microcomputador. A Figura 4.8 apresenta a medição de corrente e tensão sobre a carga.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 são apresentados os dados coletados com o microcomputador como carga.

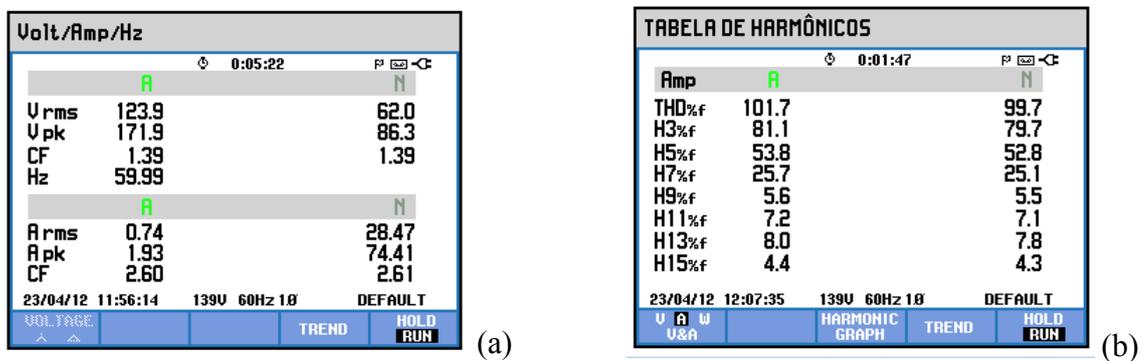


Figura 4.8 – Em (a) Valores instantâneos de tensão da rede e corrente no micro e em (b) Distorção harmônica de corrente percentual no microcomputador.

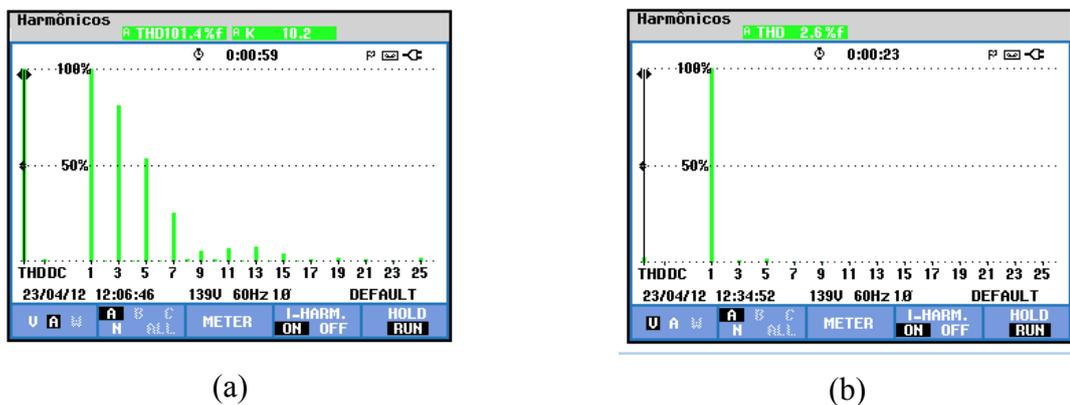


Figura 4.9 – Distorção Harmônica de um microcomputador ligado em 123,9 V, em (a) Distorção de Corrente em (b) Distorção de tensão.

Pode-se notar que a Figura 4.9-b apresenta a distorção harmônica de tensão da rede à qual o microcomputador está conectado. Está representada através das ordens harmônicas, com uma THDV de 2,7%. Vê-se também pela Figura 4.9-a, que a tensão da fonte é de 171,9 V de pico (123,9 V - RMS) e a frequência é de 59,99 Hz, que é ligeiramente inferior à frequência fundamental de nosso sistema (harmônica de primeira ordem ou fundamental).

Novamente, utilizar-se-á a frequência de 60Hz no modelo. Será mantida a premissa inicial de modelagem da carga como fontes de corrente em paralelo.

Observa-se pela Figura 4.8-b que este equipamento apresenta um grande conteúdo harmônico de corrente. Com base no espectro de harmônicas desta mesma figura é que será modelada novamente a carga.

4.4.1 Modelagem matemática para a carga não linear microcomputador

Assim como para a modelagem do conjunto reator e lâmpadas fluorescentes de 32W, para elaborar o modelo do microcomputador, será utilizada a mesma metodologia. Esta consiste em fazer-se a medição do conteúdo harmônico, coletar os dados relativos à rede, além dos dados referentes à carga, tais como, tensão eficaz e de pico, corrente eficaz e de pico, potência e fator de potência.

Como dados de entrada para esta modelagem será utilizada a corrente total drenada pelo microcomputador da rede elétrica. Esta é de 1,93 A de pico ou 0,74 A – RMS (Figura 4.8-a) e a distribuição espectral dos harmônicos desta mesma corrente está representada pela Figura 4.8-b.

Então, a carga não linear será representada outra vez, por uma soma de fontes de corrente constituída cada amplitude de cada fonte de corrente proporcional ao espectro das harmônicas geradas, em cada uma das frequências lidas pelo medidor Fluke, e apresentadas de acordo com a série de Fourier mostrada na Equação 2.2 (página 7).

Com isso o microcomputador será modelado como um conjunto de fontes de corrente de frequências ímpares, ligadas em paralelo, representadas pela soma das mesmas, conforme mostrado a seguir.

De acordo com as medições realizadas e representadas pelas Figuras 4.8-a e 4.8-b, na qual a primeira figura apresenta a corrente total, e a segunda apresenta o conteúdo harmônico da corrente, e, substituindo os valores na equação 4.2, a representação das fontes de corrente será dada por:

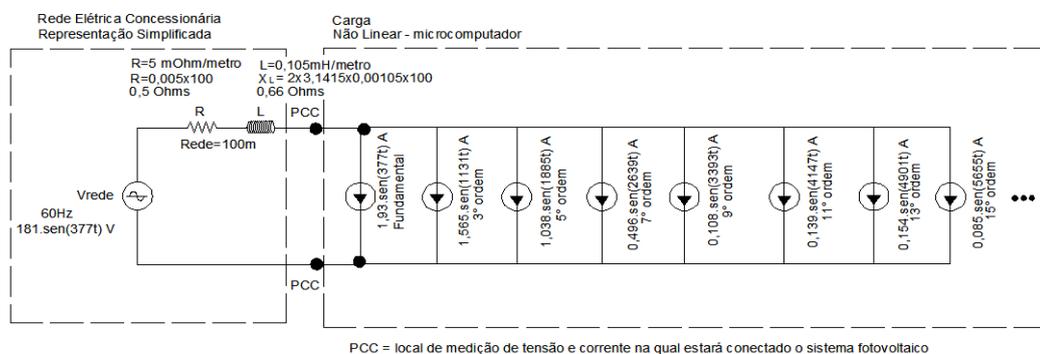
$$I_{\text{Micro}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.2)$$

Tabela 4.2 – Coeficientes em Ampères da Equação 4.2.

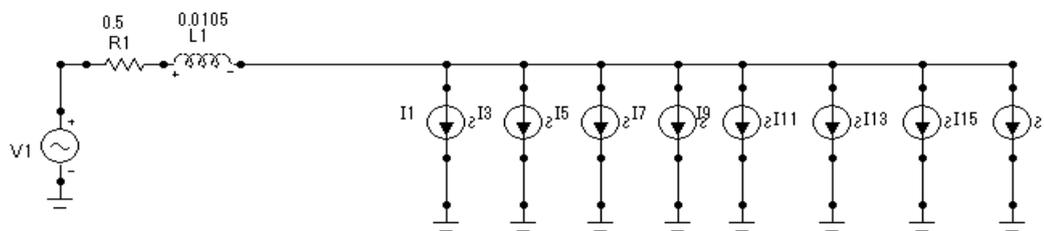
n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
$I_1 = 1,93$	$I_3 = 0,811$	$I_5 = 0,538$	$I_7 = 0,257$	$I_9 = 0,056$	$I_{11} = 0,072$	$I_{13} = 0,080$	$I_{15} = 0,044$
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

4.4.2 Simulação computacional do modelo: carga não linear microcomputador

Utilizando-se do programa de computador Microcap 7.0 para verificar esta representação graficamente, será apresentado o desenvolvimento conforme mostrado a seguir, adotando para a modelagem e simulação as seguintes premissas: a rede elétrica como sendo monofásica, senoidal de 181 Volts pico (129,6 V RMS), a linha, escolhida arbitrariamente como sendo de comprimento 100m, representada por cabos elétricos com uma impedância composta por uma resistência de 0,5 Ohms e uma reatância indutiva de 0,66 Ohms ($L=0,0105H$).



a



b

Figura 4.10 – Circuito equivalente da rede elétrica a qual está conectada uma carga não linear microcomputador utilizado para a segunda simulação em (a) circuito proposto e em (b) circuito implementado no programa Microcap.

Este sistema está ligando a carga não linear (microcomputador) que é representada por um conjunto de fontes de corrente mostradas na Figura 4.10, que são expressas através da Equação 4.2.

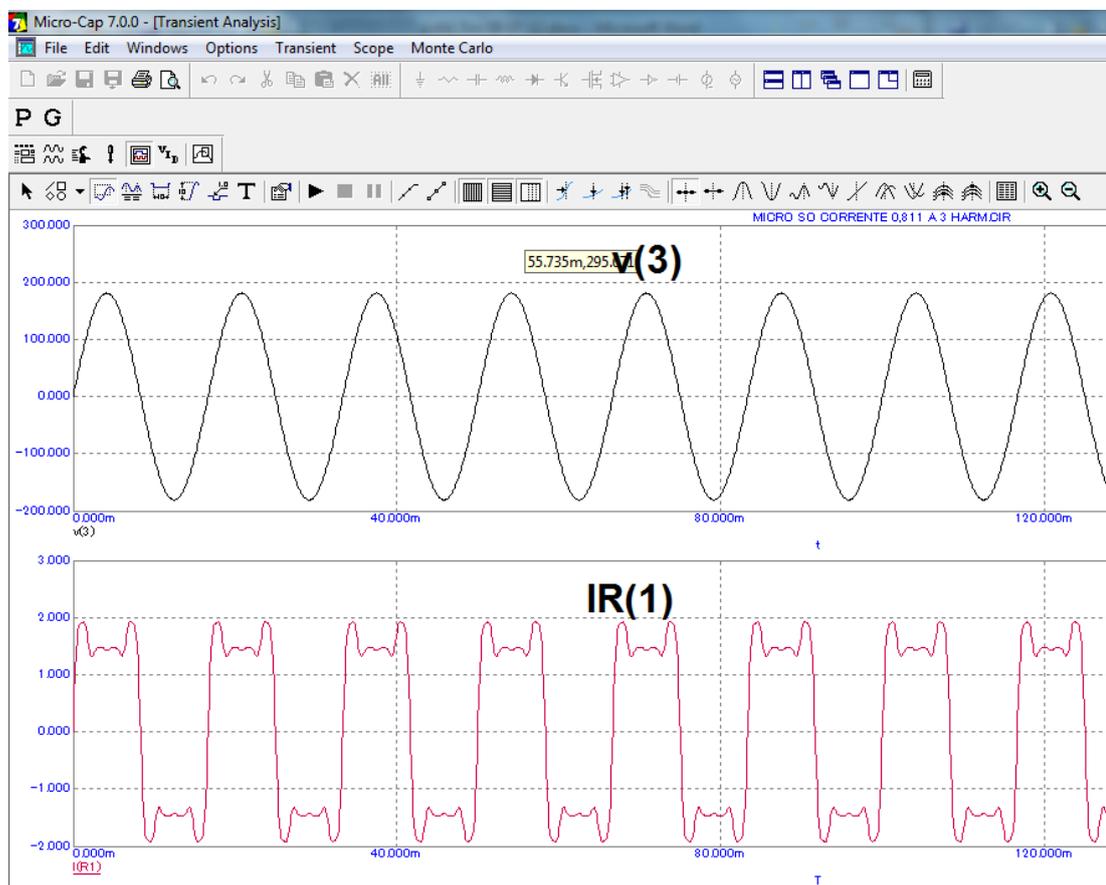


Figura 4.11 – Simulação Microcap da carga microcomputador no ponto PCC mostrado na Figura 4.10 onde IR1 é a corrente drenada da fonte.

Para fins de simulação foram utilizados os dados até a 15^a harmônica para representar a carga não linear do microcomputador.

As duas formas de onda apresentadas na Figura 4.11, são respectivamente V_3 , que é a tensão da fonte. Para esta simulação será determinada uma onda senoidal de amplitude 173V, que corresponde a 123,6 V – RMS. IR_1 é a corrente que a carga drena da fonte de alimentação.



Figura 4.12 – Medição realizada com o analisador Fluke 435, com ponteira de 40 A, na rede elétrica com o microcomputador.

Se for comparada a corrente IR_1 simulada, com a medida realizada com o Analisador Fluke 435, mostrada na Figura 4.12, pode ser visto que a corrente mostrada são pulsos de onda quadrada. O modelo apresenta uma forma de onda distorcida, mas, verifica-se que a simulação reproduz a onda quadrada gerada, mas distorcida.

4.5 Aplicabilidade da modelagem para dez microcomputadores ligados à rede

Para verificação do modelo representando um conjunto de cargas não lineares, será utilizado um conjunto de 10 microcomputadores simulados conforme modelo mostrado na Figura 4.13, em paralelo (que é a maneira que é como se ligam todas as cargas numa rede elétrica residencial, comercial ou industrial). Para tanto, a fim de serem mantidas as proporcionalidades, ao se adicionar 10 microcomputadores em paralelo, cada uma das fontes de corrente serão representadas com dez vezes a amplitude, para cada uma das harmônicas do modelo. O circuito simulado no Microcap é o mostrado na Figura 4.13.

A simulação com dez microcomputadores será realizada substituindo os valores apresentados na Tabela 4.3 na equação 4.3, que representarão as fontes de corrente do modelo. A tabela 4.3 apresenta os dados da Tabela 4.2 ,multiplicados em 10 vezes para que represente os dez microcomputadores.

$$I_{10\text{Micro}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.3)$$

Tabela 4.3 – Coeficientes em Ampères da Equação 4.3.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
$I_1 = 19,3$	$I_3 = 8,11$	$I_5 = 5,38$	$I_7 = 2,57$	$I_9 = 0,56$	$I_{11} = 0,72$	$I_{13} = 0,80$	$I_{15} = 0,44$
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

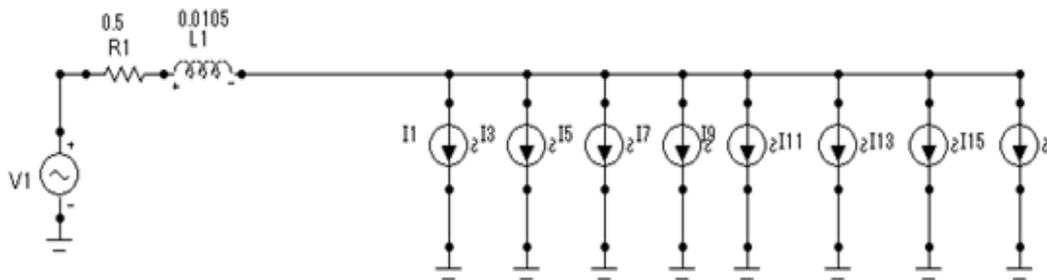


Figura 4.13 – Circuito correspondente a 10 microcomputadores ligados em paralelo em uma mesma fonte.

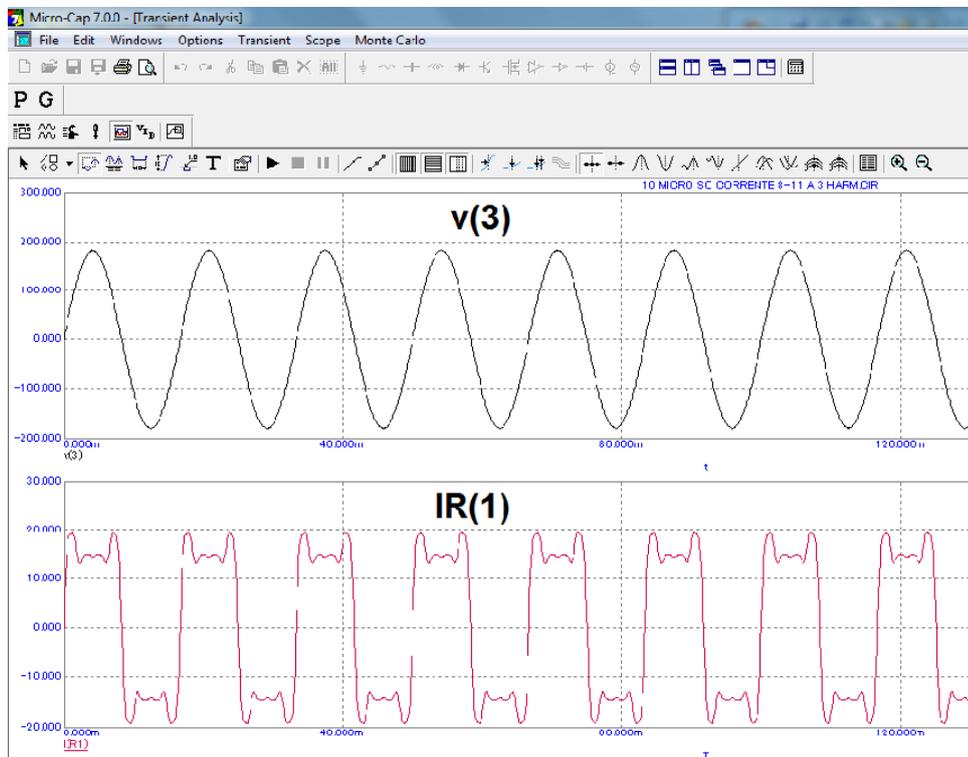


Figura 4.14 – Simulação Microcap de 10 microcomputadores no ponto PCC mostrado na Figura 4.11 onde IR1 é a corrente drenada as fonte.

Como se pode verificar na Figura 4.14, as duas formas de onda apresentadas são respectivamente V_3 , que é a tensão da fonte. Para esta simulação foi determinada uma onda senoidal de amplitude 173V, que corresponde a 123,6 V – RMS. IR_1 é a corrente que a carga está drenando da fonte de alimentação.

Pode-se verificar que o aumento das cargas não lineares na simulação aumentou a deformação da forma de onda da corrente, conforme mostrado em IR_1 da Figura 4.14.

Verificou-se também que a proposta de um modelo para representar as cargas não lineares como forma de inseri-las em programa de computador, em especial no FVCONECT do LABSOL da UFRGS, constitui-se em um ferramental apropriado.

Ficou demonstrado através das simulações realizadas tanto para um conjunto reator e lâmpadas, quanto para um microcomputador, que o modelo demonstra as distorções intrínsecas de um sistema não linear.

Nota-se também que a simulação do circuito da Figura 4.13 e cujos resultados são apresentados na Figura 4.14, a qual representa 10 microcomputadores, mostra claramente as deformações de correntes devido à carga, que é repassada à fonte, onde será conectado o sistema FV, amplificada em seu efeito pela adição de corrente, o que era de se esperar devido ao aumento das cargas em paralelo, que drenam mais corrente da fonte de alimentação.

4.6 Formas de onda de medições realizadas em um inversor Fronius IG30 conectado à rede em três situações de potência gerada

O LABSOL da UFRGS realizou medições de níveis harmônicos de tensão e corrente em um inversor Fronius IG30 conectado à rede elétrica. Foram aproveitadas neste trabalho estas medições para reconstrução das formas de onda de corrente do inversor.

O objetivo desta reconstrução é poder aplicar o modelo proposto sobre esta rede elétrica medida, acrescentando-se o efeito da adição de dez microcomputadores ao sistema, de maneira que possa ser verificada a aplicabilidade real do modelo.

Os dados obtidos através da medição do LABSOL foram agrupados na Tabela 4.4. As medições realizadas estendem-se até a 50ª harmônica. Foi utilizada da tabulação os dados até a 15ª harmônica, de maneira a ficar compatibilizada com o modelo da carga não linear.

Tabela 4.4 – Medições realizadas pelo LABSOL em um inversor Fronius IG30 conectado a rede elétrica em três níveis de geração de potência (valores de corrente e tensão em p.u.) – 172W – 980W – 2575W.

Ordem Harm.	Potência Gerada (W)	Frequência (Hz)	Frq_Ang (Rad/s)	I_pico(p.u.)	V_pico(p.u.)
1 ^a	172	60	377	1,3731	1,4136
3 ^a	172	120	754	0,0286	0,000534
5 ^a	172	180	1131	0,0956	0,006519
7 ^a	172	240	1508	0,0115	0,000332
9 ^a	172	300	1884	0,1815	0,038780
11 ^a	172	360	2261	0,0096	0,000213
13 ^a	172	420	2638	0,1180	0,006171
15 ^a	172	480	3015	0,0121	0,000239
1 ^a	980	60	377	1,4118	1,4137
3 ^a	980	120	754	0,0027	0,00074
5 ^a	980	180	1131	0,0216	0,00659
7 ^a	980	240	1508	0,0015	0,00029
9 ^a	980	300	1884	0,0684	0,03467
11 ^a	980	360	2261	0,0013	0,00027
13 ^a	980	420	2638	0,0099	0,00674
15 ^a	980	480	3015	0,0007	0,00014
1 ^a	2575	60	377	1,4112	1,4134
3 ^a	2575	120	754	0,0018	0,00103
5 ^a	2575	180	1130	0,0262	0,00632
7 ^a	2575	240	1507	0,0009	0,00036
9 ^a	2575	300	1884	0,0616	0,03955
11 ^a	2575	360	2261	0,0022	0,00030
13 ^a	2575	420	2638	0,0085	0,00646
15 ^a	2575	480	3014	0,0026	0,00023

Como pode ser observado na Tabela 4.4, os valores são apresentados em “por unidade (p.u.)” que são adimensionais, tanto para corrente como para tensão, e referem-se a valores de pico. Na Tabela 4.5 será realizada a conversão para corrente e tensão efetivamente entregue.

Utilizando-se do mesmo princípio das simulações anteriores, será utilizada a série de Fourier, representada pela Equação 2.2 para remontar as ondas de corrente, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Medições realizadas pelo LABSOL em um inversor Fronius IG30 conectado a rede elétrica em três níveis de geração de potência (valores de corrente e tensão em A e V de pico respectivamente) – 172W – 980W – 2575W.

Ordem Harm.	Potência Gerada (W)	Frequência (Hz)	Frq_Ang (Rad/s)	I_pico(A)	V_pico(V)
1 ^a	172	60	377	1,8596	179,5248
3 ^a	172	120	754	0,0387	0,0679
5 ^a	172	180	1131	0,1295	0,8279
7 ^a	172	240	1508	0,0156	0,0422
9 ^a	172	300	1884	0,2459	4,9251
11 ^a	172	360	2261	0,0130	0,0270
13 ^a	172	420	2638	0,1598	0,7838
15 ^a	172	480	3015	0,0164	0,0303
1 ^a	980	60	377	10,8944	179,5388
3 ^a	980	120	754	0,0205	0,0937
5 ^a	980	180	1131	0,1664	0,8369
7 ^a	980	240	1508	0,0113	0,0373
9 ^a	980	300	1884	0,5275	4,4036
11 ^a	980	360	2261	0,0101	0,0344
13 ^a	980	420	2638	0,0767	0,8564
15 ^a	980	480	3015	0,0056	0,0181
1 ^a	2575	60	377	28,6126	179,5019
3 ^a	2575	120	754	0,0365	0,1312
5 ^a	2575	180	1130	0,5322	0,8030
7 ^a	2575	240	1507	0,0182	0,0456
9 ^a	2575	300	1884	1,2480	5,0226
11 ^a	2575	360	2261	0,0437	0,0384
13 ^a	2575	420	2638	0,1730	0,8209
15 ^a	2575	480	3014	0,0532	0,0296

De acordo com a Tabela 4.5 para o nível de potência gerada através do inversor Fronius IG30 pelo sistema fotovoltaico, de 172W, foi elaborada a Tabela 4.6 que substituindo os valores na equação 4.3, a representação das fontes de corrente para serem utilizadas no modelo proposto e ser simulado, será dada por:

$$I_{\text{Fronius172W}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.4)$$

Tabela 4.6 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.4 para potência gerada de 172W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
$I_1 = 1,85$	$I_3 = 0,039$	$I_5 = 0,129$	$I_7 = 0,015$	$I_9 = 0,2459$	$I_{11} = 0,013$	$I_{13} = 0,159$	$I_{15} = 0,01$
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

A forma de onda de corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 172W é mostrada na Figura 4.15. Nota-se a distorção da forma de onda na forma de onda da senóide. Calculou-se o THDi e chegou-se ao valor de 17%.

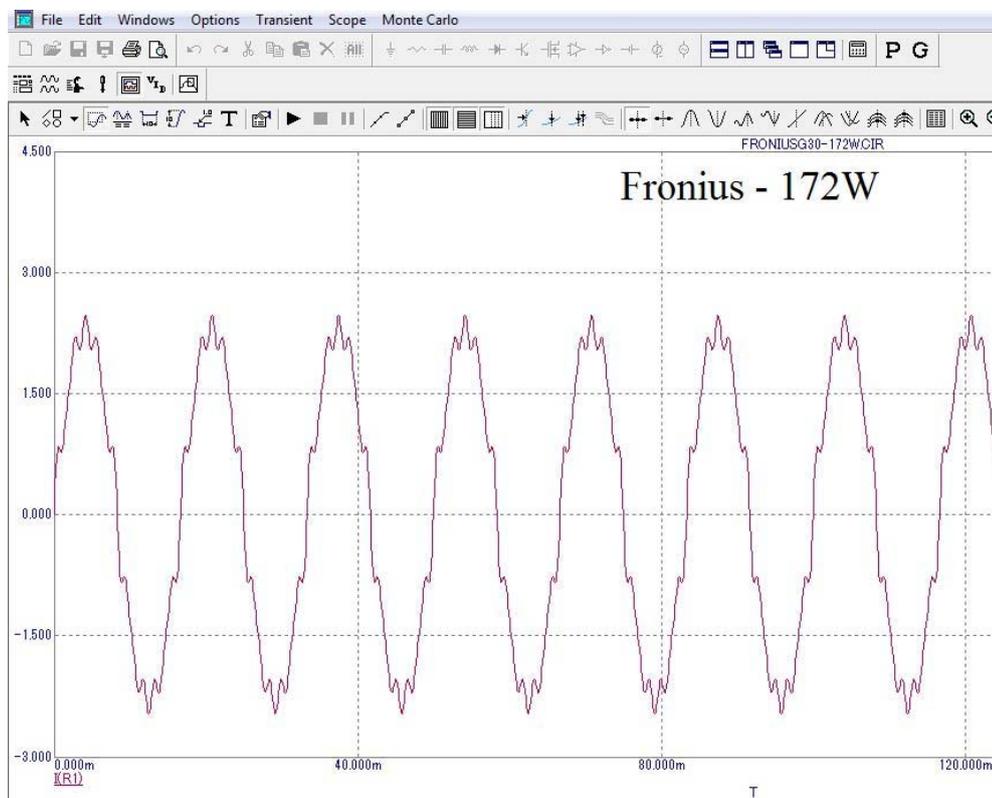


Figura 4.15 – Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 172W.

De acordo com a Tabela 4.4 para o nível de potência gerada através do inversor Fronius IG30 pelo sistema fotovoltaico, de 980W, foi elaborada a Tabela 4.7 que substituindo os valores na equação 4.5, a representação das fontes de corrente para serem utilizadas no modelo proposto e ser simulado, será dada por:

$$I_{\text{Fronius980W}} = \sum_{n=1}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.5)$$

Tabela 4.7 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.5 para potência gerada de 980W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
I ₁ =10,89	I ₃ =0,02	I ₅ =0,166	I ₇ =0,011	I ₉ =0,5275	I ₁₁ =0,0101	I ₁₃ =0,077	I ₁₅ =0,005
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

A forma de onda de corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 980W é mostrada na Figura 4.16. Nota-se ainda distorção da onda só que menor que a com 172W gerados. Calculou-se o THDi e chegou-se ao valor de 5%.

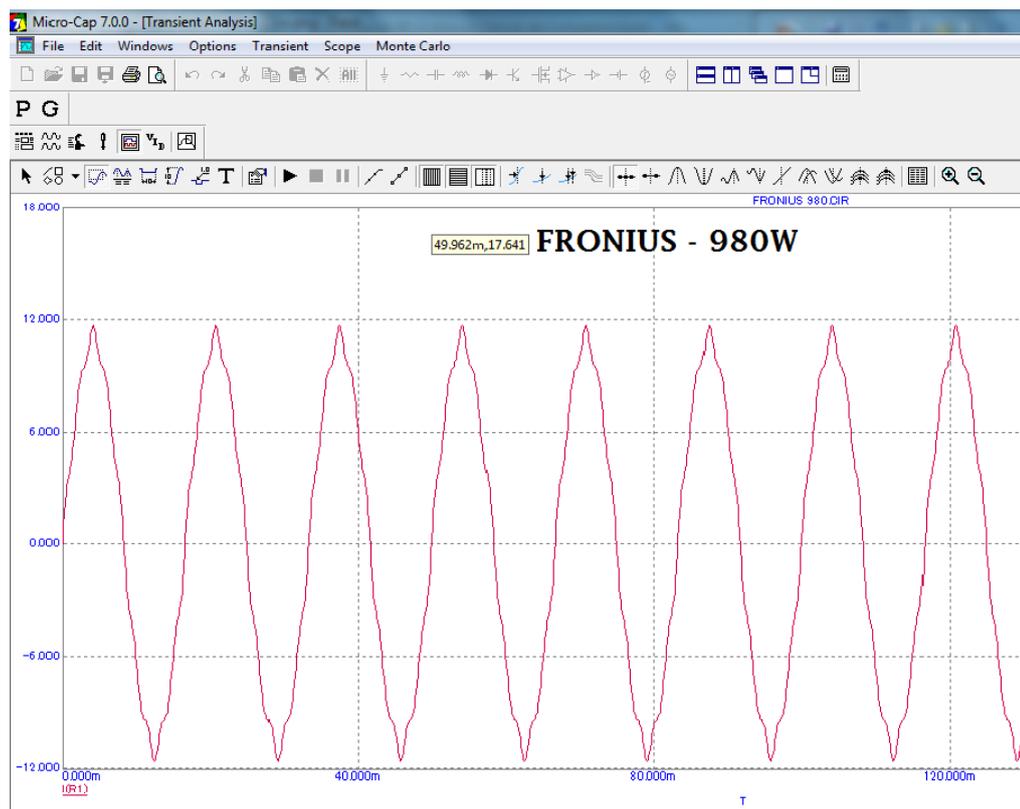


Figura 4.16 – Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 980W.

De acordo com a Tabela 4.4 para o nível de potência gerada através do inversor Fronius IG30 pelo sistema fotovoltaico, de 2575W, foi elaborada a Tabela 4.8 que

substituindo os valores na equação 4.5, a representação das fontes de corrente para serem utilizadas no modelo proposto e ser simulado, será dada por:

$$I_{\text{Fronius2575W}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.6)$$

Tabela 4.8 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.6 para potência gerada de 2575W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
I ₁ =28,61	I ₃ =0,036	I ₅ =0,532	I ₇ =0,018	I ₉ =1,248	I ₁₁ =0,043	I ₁₃ =0,173	I ₁₅ =0,053
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

A forma de onda de corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 2575W é mostrada na Figura 4.17. Nota-se que apesar ainda de haver distorção, é menor que a forma de onda originária do sistema com 980W de geração. Calculou-se o THDi e chegou-se ao valor de 4%.

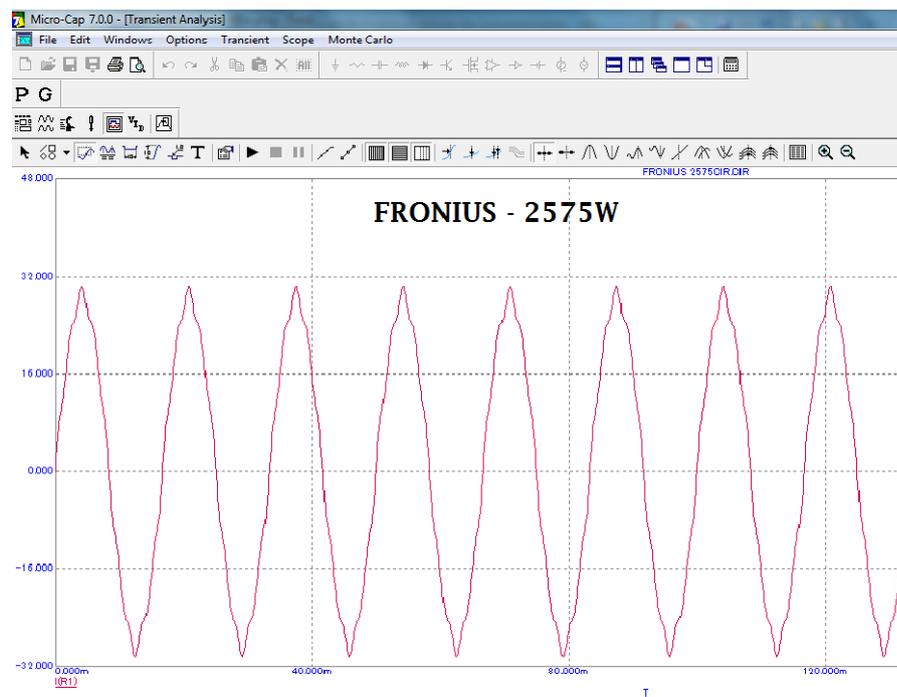


Figura 4.17–Forma de onda corrente gerada pelo Fronius IG30 com potência gerada de 2575W.

4.7 Simulação na rede elétrica do modelo proposto com a inserção do inversor Fronius IG30

De posse dos dados de corrente e tensão e das formas de onda nos três níveis de potência gerada pelo inversor Fronius IG30, serão inseridos no circuito com dez microcomputadores simulados anteriormente, a fim de demonstrar prováveis distorções causadas pela inserção dos equipamentos na rede elétrica. Como o SFCR fornecerá corrente à carga, estaremos simulando apenas a diferença de corrente (inversor – carga) como sendo a efetivamente drenada da fonte.

A simulação no Microcap 7.0 será executada de acordo com o circuito implementado na Figura 4.18, na qual está mostrado o circuito com os componentes fixos, sendo que o que irá ser variado, de acordo com as componentes harmônicas, são as fontes de corrente.

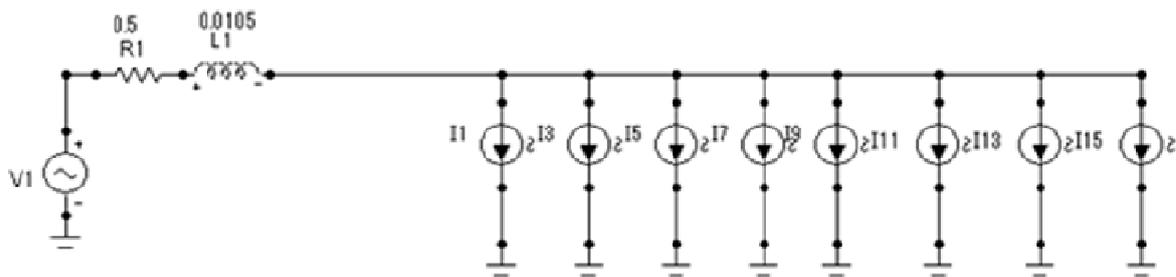


Figura 4.18 – Circuito implementado no programa Microcap para simular as três situações de potência do inversor Fronius IG30 em paralelo com o circuito com dez microcomputadores

Para tal, serão construídas três novas tabelas, uma para cada nível de potência gerada pelo inversor, que reproduzirá esta soma dos efeitos. A primeira tabela é composta da composição dos dados da Tabela 4.3 com a Tabela 4.6, gerando os dados da Tabela 4.9 que inseridos na Equação 4.6, a representará a corrente drenada da fonte de energia, através da rede elétrica.

O efeito das fontes de corrente do modelo proposto para os dez microcomputadores adicionado às do Fronius IG30 podem ser simuladas, de acordo com a Equação 4.6.

$$I_{\text{Fronius+10Micro-172W}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}\langle n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n \rangle \rangle \quad (4.6)$$

Tabela 4.9 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.6 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 172W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
$I_1=21,159$	$I_3=8,13$	$I_5=5,509$	$I_7=2,585$	$I_9= 0,806$	$I_{11}=0,733$	$I_{13}=0,816$	$I_{15}=0,45$
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

A forma de onda de corrente mostrada na Figura 4.19 representa o efeito da inserção do sistema fotovoltaico na rede elétrica que alimenta os dez microcomputadores. A simulação foi efetuada com o inversor sendo inserido em paralelo com a carga e com a rede.

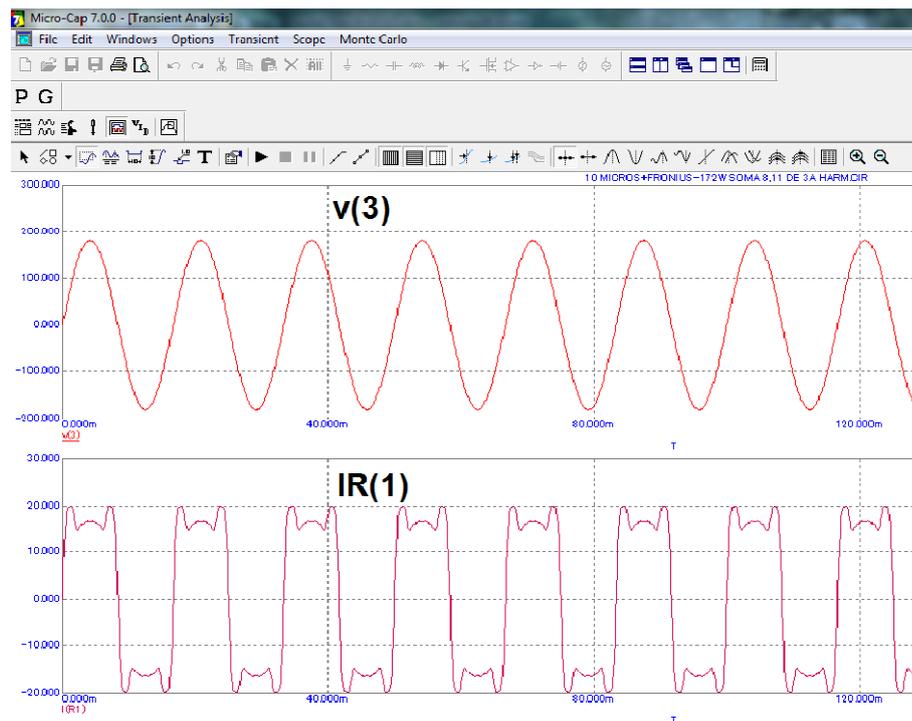


Figura 4.19 – Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 172W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros

A segunda tabela será composta da soma dos dados da Tabela 4.3 com a Tabela 4.7, gerando os dados da Tabela 4.10 que inseridos na Equação 4.7, a representará a corrente drenada da fonte de energia, através da rede elétrica.

O efeito das fontes de corrente do modelo proposto para os dez microcomputadores adicionado às do Fronius IG30 podem ser simuladas, de acordo com a Equação 4.7.

$$I_{\text{Fronius+10Micro-980W}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.7)$$

Tabela 4.10 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.7 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 980W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
I ₁ =30,19	I ₃ =8,13	I ₅ =5,546	I ₇ =2,581	I ₉ = 1,088	I ₁₁ =0,73	I ₁₃ =0,877	I ₁₅ =0,445
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

A forma de onda de corrente mostrada na Figura 4.20 representa o efeito da inserção do sistema fotovoltaico na rede elétrica que alimenta os dez microcomputadores. A simulação foi efetuada com o inversor sendo inserido em paralelo com a carga e com a rede.

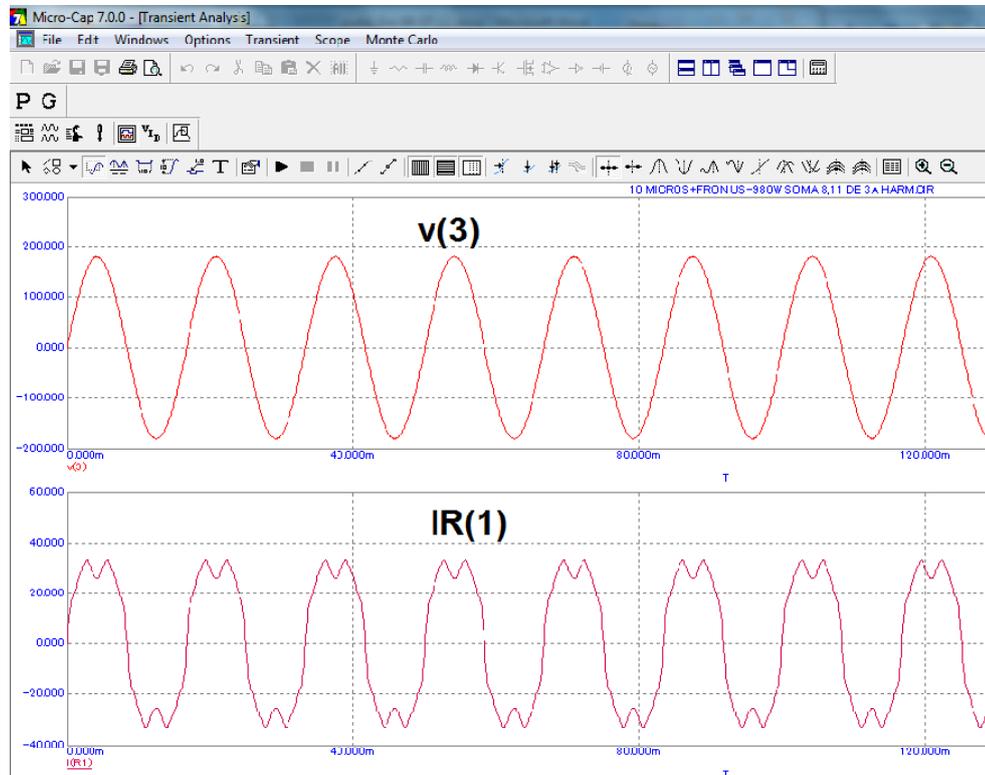


Figura 4.20 – Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 980W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros.

A terceira tabela será composta da soma dos dados da Tabela 4.3 com a Tabela 4.8 , gerando os dados da Tabela 4.11 que inseridos na Equação 4.8, a representará a corrente drenada da fonte de energia, através da rede elétrica.

O efeito das fontes de corrente do modelo proposto para os dez microcomputadores adicionado às do Fronius IG30 podem ser simuladas, de acordo com a Equação 4.8.

$$I_{\text{Fronius+10Micro-2575W}} = \sum_{n=1(\text{impares})}^{15} I_n \langle \text{sen}(n \cdot \omega \cdot t + \varphi_n) \rangle \quad (4.8)$$

Tabela 4.11 – Coeficientes em Ampéres da Equação 4.8 para simulação de um sistema composto por dez microcomputadores e um sistema de geração com inversor Fronius IG30 com potência gerada de 2575W.

n = 1	n = 3	n = 5	n = 7	n = 9	n = 11	n = 13	n = 15
I ₁ =47,91	I ₃ =8,436	I ₅ =5,912	I ₇ =2,568	I ₉ =1,808	I ₁₁ =0,763	I ₁₃ =0,973	I ₁₅ =0,493
60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz

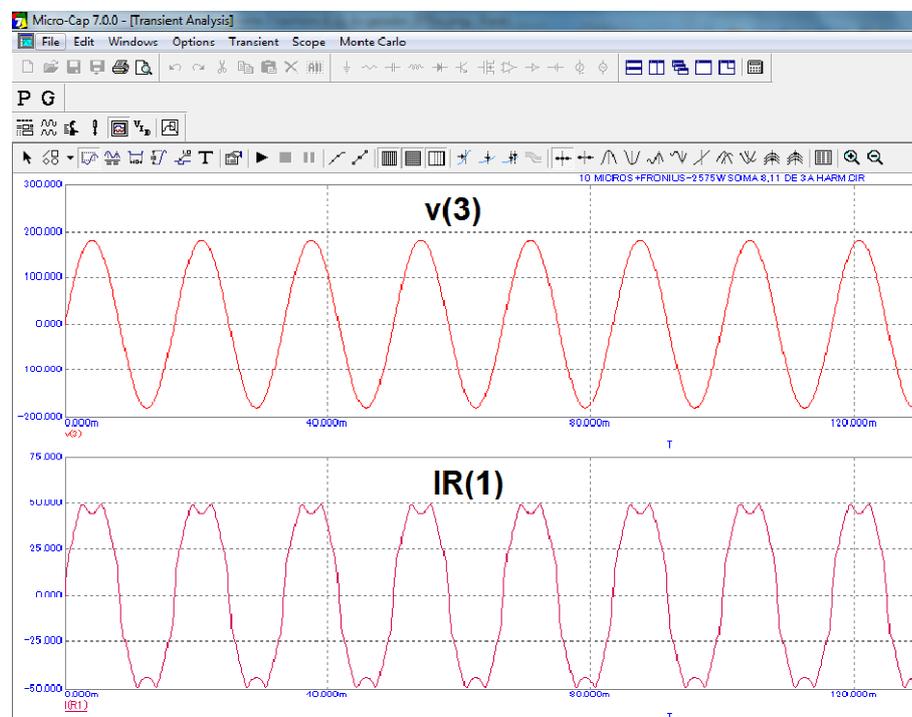


Figura 4.21 – Forma de onda de corrente simulada através da inserção do inversor Fronius IG30, gerando 2575W de potência injetada na rede, no circuito que alimenta os dez microcomputadores, em paralelo com a rede e com os micros.

A forma de onda de corrente mostrada na Figura 4.21 representa o efeito da inserção do sistema fotovoltaico na rede elétrica que alimenta os dez microcomputadores. A simulação foi efetuada com o inversor sendo inserido em paralelo com a carga e com a rede.

Verifica-se que, após estas três últimas simulações, nas quais seus resultados encontram-se representados pelas Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 respectivamente, alteram, conforme havia sido suposto, a qualidade da energia do sistema, e que o modelo proposto contempla este efeito.

Se forem comparados os resultados apresentados quando apenas o inversor está ligado a rede, nas três potências geradas pelo mesmo, cujos resultados são os apresentados nas Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 com os obtidos nas simulações as quais foram inseridos os dez microcomputadores, verifica-se as modificações da forma de onda, com sua degradação.

Portanto, pode-se observar que o modelo reproduz os efeitos de degradação da qualidade de energia quando da inclusão de cargas não lineares no sistema.

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Na primeira parte da dissertação os objetivos propostos foram mostrados. Após, fez-se uma revisão de conteúdos relativos aos conceitos aplicados neste trabalho.

Continuando o desenvolvimento, foram apresentados, na forma de revisão bibliográfica, diversos artigos que tratam sobre a conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica, no qual a maioria deles modelam as redes e as cargas elétricas conectadas aos sistemas fotovoltaicos como impedâncias, que são cargas com comportamento linear.

Partiu-se, então, para a análise dos modelos atualmente utilizados nas simulações apresentadas na bibliografia.

Com o modelo proposto previa a consideração de cargas não lineares, buscou-se a caracterização de dois tipos de cargas elétricas: uma constituindo-se de um conjunto de um reator eletrônico acoplado a duas lâmpadas fluorescentes de 32W e o outro, um microcomputador.

As simulações realizadas apresentaram formas de onda de corrente próximas às reais. A partir de então, houve a implementação do modelo.

A modelagem baseou-se em medições de corrente, tensão, potência, fator de potência e principalmente distorção harmônica, que é a base da implementação do modelo.

A implementação contempla um conjunto reator eletrônico, um microcomputador e um conjunto de dez microcomputadores, com o objetivo de demonstrar que a adição de mais componentes não lineares ao sistema degradaria ainda mais a qualidade de energia da rede. Verificou-se que a hipótese se confirmou.

Como maneira de demonstrar que o modelo pode ser aplicado em programas de computador para simulação com sistemas fotovoltaicos conectados à rede, utilizou-se de coleta de dados realizadas pelo LABSOL-UFRGS em um inversor Fronius IG30 em diversas condições de geração.

Três conjuntos de dados coletados que correspondiam às potências geradas de 172W, 980W e 2575W foram escolhidos. Neste conjunto de dados, foram selecionados apenas as componentes harmônicas que correspondiam às simulações realizadas para o modelo com o conjunto reator mais duas lâmpadas fluorescentes e microcomputador. Foi utilizada da tabulação os dados até a 15ª harmônica, de maneira a ficar compatibilizada com o modelo da

carga não linear. A partir destas séries, reconstruíram-se as formas de onda do inversor Fronius IG30 nas três potências. Após, inseriu-se o modelo do inversor Fronius IG30 no modelo de rede elétrica com dez microcomputadores a fim de poder-se comparar a forma de onda somente com o inversor e `aquela com os dez microcomputadores.

Verificou-se, novamente, que o modelo proposto reproduziu as distorções causadas na corrente do sistema, confirmando a aplicabilidade do modelo, conforme era o objetivo deste trabalho.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como sugestão de desenvolvimento de trabalhos futuros, é a implementação de modificações na modelagem de aquisição de dados deste modelo, para que o mesmo possa ser aplicado no programa de computador FVCONNECT do LABSOL – UFRGS ou outro programa de simulação aplicáveis a módulos FV e inversores para SFCR.

Devido ao programa FVCONNECT ser concebido para elaborar projetos e arranjos de SFCR, fica como sugestão a inserção dos modelos apresentados neste trabalho, como parâmetros (cargas) para dimensionamento dos painéis.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (NBR IEC 62116) - **Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**, 2012.

Aiello, M.; Cataliotti, A.; Favuzza S.; Graditi, G. **Theoretical and experimental comparison of total harmonic distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 21, p. 1390-7, 2006.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa 482**. Capítulo I – Das Disposições Preliminares, Artigo 2º – Incisos I e II, 17/04/2012.

Arrillaga, J., Smith, Bruce C., Watson, Neville R., Wood, Alan R. **Power System Harmonic Analysis**. Wiley, 1997.

Badoud, A. E., Khemliche, M. **Grid-Connected Modeling, Control and Simulation of Singlephase two-Level Photovoltaic Power Generation System Coupled to a Permanent Magnet Synchronous Motor** . 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications (WOSSPA), p. 29-34, 2011.

Balathandayuthapani, S., Edrington, C.S., Henry, S.D., Cao, J. **Analysis and Control of a Photovoltaic System: Application to a High-Penetration Case Study**. IEEE Systems Journal, v. PP , p. 1-1, 2011.

Benner, J. P.; Kazmerski, L. **Photovoltaics gaining greater visibility**. IEEE Spectr., v. 36, p. 34–42, 1999.

Bialasiewicz, J. T. **Renewable Energy Systems With Photovoltaic Power Generators: Operation and Modeling**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, p. 2752 – 58, 2008.

Chen, X., Fu, Q., Yu, S., Zhou, L. **Unified Control of Photovoltaic Grid-connected and Poers Quality managements.** Wokshop on Power Eletronics and Intelligent Transportation System, p. 360-365, 2008.

Chicco, G.; Chlabbach, J.; Spertino, **Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations.** Solar Energy, v. 83, p. 1026–1039, 2009.

Dash, P.P; Kazerani, M. **Dynamic Modeling and Performance Analysis of a Grid-Connected Current-Source Inverter-Based Photovoltaic System.** IEEE Transactions on Susteainable Energy, v. 2, p. 443-450, 2011.

Deutsches Institut für Nurmung und Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DIN VDE 0126-1-1)- **Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid,** 2006.

DGS (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie) **Planning and Installing Photovoltaic Systems 2nd Ed.,** Earthscan , Londres, Inglaterra, 2008.

Dugan, R. C., Santoso, S., Beaty, H.W., McGranaghan, M. **Electrical Power Systems Quality.** McGraw-Hill, 2003.

Edrington, C. S.; Balathandayuthapani, S.; Cao, J. **Analysis of integrated storage and grid interfaced photovoltaic system via nine-switch three-level inverter.** IECON - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, p. 3258 – 62, 2010.

European Power Supply Manufacturers Association (EN 61000-3-2). **Harmonic Current Emissions,** 2008.

Fekete, K.; Klaic, Z.; Majdandzic, L. **Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid.** Renewable Energy, v. 43, p. 140-148, 2012.

Hamadi, A., Rahmani, S., Al-Haddad, K., Al-Turki, Y.A. **A Three-Phase Three Wire Grid-Connect Photovoltaic Energy Source With Sepic Converter to Track the Maximum**

Power Point. IECON - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, p. 3087 - 92, 2011.

Heskes, P. J. M.; Enslin, J. H. R. **Power quality behaviour of different photovoltaic inverter topologies.** PCIM-2003, 24th International Conference. Nürnberg, 2003.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE – 519). **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,** 1992.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE – 1547). **IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems,** 2003.

International Electrotechnical Commission (IEC – 61727). **Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface,** 2004.

Kjaer, S. B.; Pedersen, J. K.; Blaabjerg, F. **A review of singlephase grid-connected inverters for photovoltaic modules.** Industry Applications, IEEE Transactions, v. 41, p.1292-1306, 2005.

Kjaer, S. B.; Pedersen, J. K.; Fellow, F. B. **A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules.** IEEE Transactions Industry Applications, v. 41, p. 1292 - 1306, 2005.

Lei, Y., Zhao, Z., Xu,W., Zu, J. **Modeling and Analysis of MW-Level Grid-Connected PV Plant.** IEEE Industrial Electronics Society, p. 890-895, 2011.

Luque, A.; Hegedus, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering.** John Wiley & Sons Ltda, 2003.

Spectrum Software, **Microcap Versão 7.0** , 2002.

Papaioannou, I.T., Alexiadis, M.C., Demoulias, C.S., Labridis, D. P., Dokopoulos, P.S. **Modeling and Field Measurements of Photovoltaic Units Connected to LV Grid. Study of Penetration Scenarios.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, p. 979 - 987, 2011.

Rey-Boué, A.B, Valverde, R.G., Vila, F.A.R., Ponce, J.M.T. **An integrative approach to the design methodology for 3-phase power conditioners in Photovoltaic Grid-Connected systems.** Energy Conversion and Management, v. 56, p. 80–95, 2012.

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

SMA, Solar Technology AG. **Course of inverter SMA**, Niestetal, 2008.

SMA, Solar Technology. **Grid connection - Influence of the grid conditions in terms of connected power of PV inverters**, p. 4, 2008.

SMA, Solar Technology. **Sunny family 2008/2009**, p. 180, 2008.

Stifter, M., Burnier, D., Bletterie, B., Brunner, H., Abart, A. **Analysis Environment for Low Voltage Networks.** Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS), IEEE First International Workshop, p. 61-66, 2011.

Tan, Y.T.; Kirschen, D.S. **Impact on the Power System of a Large Penetration of Photovoltaic Generation.** Power Engineering Society General Meeting (IEEE), p.1-8, 2007.

Universidade de Minho – Departamento de Eletrónica Industrial. **Implementação de um Filtro Activo de Potência para Optimização da Interface entre a Rede e Outros Sistemas Eléctricos.** p. 28, Cap. 2 – 2004.

Urbanetz Junior, Jair., **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas : sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, orientador, Ricardo Rüter. - Florianópolis, SC, 2010.189 p.: il., grafs., tabs.

Viet, N. H.; Yokoyama, A. **Impact of Fault Ride-Through Characteristics of High-Penetration Photovoltaic Generation on Transient Stability**, International Conference on Power System Technology, 2010.

Wu, H.; Tao, X. **Three Phase Photovoltaic Grid-connected Generation Technology with MPPT Function and Voltage Control**. Power Electronics and Drive Systems (PEDS) p. 1295-1300, 2009.