



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Localização, dimensionamento e controle de compensadores ativos em redes de distribuição

**Camila Seibel Gehrke**

*Tese de doutorado submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica*

Área de Conhecimento: Processamento de Energia

Orientadores:

Antonio Marcus Nogueira Lima

Alexandre Cunha Oliveira

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Camila Seibel Gehrke, Julho de 2014



G3111 Gehrke, Camila Seibel.  
Localização, dimensionamento e controle de compensadores ativos em redes de distribuição / Camila Seibel Gehrke. - Campina Grande, 2014.  
159 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima, Prof. Dr. Alexandre Cunha Oliveira".

Referências.

1. Qualidade de Energia. 2. Distorção Harmônica. 3. Métodos de Otimização. 4. Controle Distribuído. 5. Compensadores Ativos de Potência. 6. Tese - Engenharia Elétrica. I. Lima, Antonio Marcus Nogueira. II. Oliveira, Alexandre Cunha. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.3(043)

**"LOCALIZAÇÃO, DIMENSIONAMENTO E CONTROLE DE COMPENSADORES ATIVOS  
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA "**

**CAMILA SEIBEL GEHRKE**

**TESE APROVADA EM 10/07/2014**



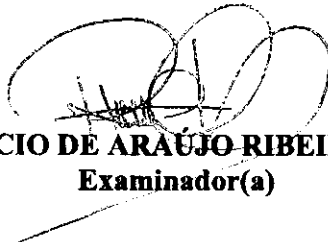
**ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG  
Orientador(a)**



**ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)**



**MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)**



**RICARDO LÚCIO DE ARAÚJO RIBEIRO, D.Sc., UFRN  
Examinador(a)**

**CARLOS ALBERTO CANESIN, Dr., UNESP  
Examinador(a)**



**CURSINO BRANDÃO JACOBINA, Dr.Ing., UFCG  
Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

# Índice

Índice . . . . .	i
Índice de Tabelas . . . . .	v
Índice de Figuras . . . . .	vii
Lista de Símbolos . . . . .	xv
Glossário . . . . .	xix
Resumo . . . . .	1
Abstract . . . . .	2
<b>1 Introdução Geral . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1 Objetivos . . . . .	6
1.2 Estrutura do documento . . . . .	7
1.3 Simbologia . . . . .	9
1.4 Principais contribuições . . . . .	10
<b>2 Fundamentação . . . . .</b>	<b>11</b>
2.1 Modelo das cargas . . . . .	12
2.2 Modelo do APLC . . . . .	13
2.2.1 Restrições do APLC . . . . .	14
2.3 Modelo da DG . . . . .	16
2.4 Modelo do regulador de tensão . . . . .	16
2.5 Modelo do banco de capacitores . . . . .	17
2.6 Modelo do segmento de linha . . . . .	17

---

2.7	Equacionamento . . . . .	20
2.8	Regulamentação e normatização . . . . .	20
2.9	Efeito dos harmônicos . . . . .	22
2.9.1	Segmentos de linha . . . . .	22
2.10	Conclusões . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Localização e dimensionamento dos APLCs . . . . .</b>	<b>24</b>
3.1	Formulação do problema - Único APLC e Único cenário . . . . .	26
3.1.1	Função Objetivo . . . . .	27
3.1.2	Restrições . . . . .	28
3.1.3	Solução com Algoritmo Tradicional . . . . .	28
3.1.4	Circuito exemplo . . . . .	32
3.2	Formulação do problema - Múltiplos APLCs e Único cenário . . . . .	34
3.2.1	Função Objetivo . . . . .	35
3.2.2	Função viabilidade . . . . .	36
3.2.3	Solução com Algoritmo Sequencial . . . . .	37
3.2.4	Solução com GA . . . . .	39
3.2.5	Solução com Algoritmo de PSO . . . . .	40
3.2.6	Solução com Algoritmo de ABC . . . . .	43
3.3	Formulação do problema proposto - Múltiplos APLCs e Múltiplos Cenários . . . . .	46
3.3.1	Função Objetivo . . . . .	46
3.3.2	Obtenção dos cenários críticos . . . . .	47
3.3.3	Restrições . . . . .	48
3.3.4	Solução para múltiplos cenários . . . . .	48
3.4	Resultados da localização e dimensionamento . . . . .	49
3.4.1	SEP estudado . . . . .	49
3.4.2	Obtenção dos dados do SEP . . . . .	50
3.4.3	Análise dos índices da OF e soluções de otimização . . . . .	52
3.4.4	Cenários estudados . . . . .	58
3.4.5	Resultados . . . . .	60
3.4.6	Estudo de caso . . . . .	65
3.5	Conclusão . . . . .	67

---

<b>4</b>	<b>Controle dos APLCs</b>	70
4.1	Análise da estabilidade	72
4.1.1	Modelo dinâmico	73
4.1.2	Análise da robustez	76
4.1.3	Múltiplos APLCs	77
4.2	Operação cooperativa	79
4.2.1	Controle proposto	81
4.2.2	Análise do controle	86
4.3	Coordenação	88
4.3.1	Supervisório local	90
4.3.2	Supervisório Global	91
4.3.3	Sensibilidade dos PACs	94
4.4	Resultados	96
4.4.1	Identificação da planta e análise da estabilidade	97
4.4.2	Análise do controle sob variações do SEP	100
4.4.3	Comparação das estratégias de controle	111
4.4.4	Análise dos controladores sob falta no sistema	117
4.4.5	Análise da operação local com referência fixa	121
4.4.6	Análise da operação com referência coordenada	126
4.5	Conclusão	129
<b>5</b>	<b>Plataforma de testes</b>	131
5.1	Revisão bibliográfica de sistemas HIL	133
5.2	Objetivos	138
5.3	Sistema <i>Hardware-in-loop</i> (HIL)	139
5.3.1	Interfaces de conexão	139
5.3.2	Circuito emulado no OPAL	140
5.3.3	Controle implementado no DSP	141
5.3.4	Resultados	142
5.4	Conclusão	143
<b>6</b>	<b>Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros</b>	145
6.1	Perspectivas de Trabalhos Futuros	146

---

Referências Bibliográficas . . . . .	148
A Tabelas dos elementos do SEP . . . . .	154
B Controle de decaimento de geradores . . . . .	156

# Índice de Tabelas

3.1	Amplitude da corrente por cada harmônico, considerando a corrente de uma carga não linear de 3 MW. . . . .	50
3.2	Resultados em MATLAB/Simulink para o sistema IEEE de 18 barras . . . .	51
3.3	Avaliação da localização do APLC frente a diferentes índices com corrente máxima. . . . .	52
3.4	Comparação da amplitude da corrente sem restrição para o PAC 5 e para o PAC 7 considerando os harmônicos selecionados. Em destaque as correntes com maior amplitude por harmônico. . . . .	53
3.5	Avaliação da localização do APLC frente a diferentes índices com corrente mínima. . . . .	54
3.6	Comparação da amplitude da corrente com restrição para o PAC 5 e para o PAC 7 considerando os harmônicos selecionados. Em destaque as correntes com maior amplitude por harmônico. . . . .	54
3.7	Corrente de compensação obtida pelo método tradicional. A corrente complexa no PAC $m$ -ésima é dada por $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H  I_{(m,h)}  \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ . . . . .	56
3.8	Minimização da $IF$ . . . . .	57
3.9	Ramo 1 - Resultados sem APLC . . . . .	59
3.10	Ramo 2 - Resultados sem APLC . . . . .	60
3.11	Ramo 1 - Resultado de localização com solução de cenários individuais. . . .	61
3.12	Ramo 1 - Resultado de localização com solução de múltiplos cenários. . . . .	61
3.13	Ramo 2 - Resultado de localização com solução de cenários individuais. . . .	61
3.14	Ramo 2 - Resultado de localização com solução de múltiplos cenários. . . . .	62
3.15	Ramo 1 - Resultado da localização do APLC e da corrente eficaz, entre parênteses, para soluções de múltiplos cenários. . . . .	63



---

3.16	Ramo 2 - Resultado da localização do APLC e da corrente eficaz, entre parênteses, para soluções de múltiplos cenários. . . . .	63
3.17	Cenário teste 1 - Resultados dos índices de qualidade sem APLC . . . . .	66
3.18	Cenário teste 2 - Resultados dos índices de qualidade sem APLC . . . . .	66
3.19	Cenários teste - Resultado da distribuição de potência dos APLCs. . . . .	66
3.20	Cenário teste 1 - Resultados dos índices de qualidade com APLC. . . . .	67
3.21	Cenário teste 2 - Resultados dos índices de qualidade com APLC . . . . .	67
4.1	Resultado da análise de sensibilidade à carga. . . . .	95
4.2	Parâmetros utilizados do APLC. . . . .	97
4.3	Amplitudes e ângulos das impedâncias resultantes da planta estimada e da matriz impedância para o harmônico $h = 5$ . . . . .	98
4.4	IHD com operação do controle proposto. . . . .	116
4.5	Resumo da operação de APLC com CCM. . . . .	117
4.6	Resultado do nível de THD e ponto com maior distorção sem a operação do APLC. . . . .	122
A.1	Dados dos segmentos de linha do SEP estudado. . . . .	154
A.2	Dados da carga e banco de capacitores do SEP estudado. . . . .	155

# Índice de Figuras

1.1	Planejamento da solução de localização, dimensionamento e controle de compensadores ativos apresentada na tese. . . . .	8
2.1	Diagrama unifilar simplificado do sistema proposto. . . . .	12
2.2	Representações simplificadas de carga não linear. . . . .	13
2.3	Representações das cargas não lineares como fonte ideal de corrente ou fonte de tensão harmônica. . . . .	13
2.4	Representação simplificada (a) da implementação real do APLC, (b) da representação do APLC como fonte controlada e (c) da conexão desse com o SEP. . . . .	14
2.5	Meio ciclo da corrente de compensação: a) forma de onda ideal, b) forma de onda sintetizada pela corrente regulada do inversor de tensão, c) dados adquiridos pelo controle digital. . . . .	15
2.6	Representação da DG. . . . .	16
2.7	Representação do regulador de tensão. . . . .	17
2.8	Representação do banco de capacitores. . . . .	17
2.9	Segmento de um linha $\pi$ . . . . .	18
2.10	Circuito simplificado para análise da influência corrente do APLC nas tensões dos PAC. . . . .	18
2.11	Representação simplificada do SEP: a) sem compensação e b) com compensação do APLC. . . . .	21
3.1	Circuito considerando uma carga não linear no PAC $k=2$ . . . . .	33
3.2	Circuito considerando um APLC no PAC $m=2$ . . . . .	33
3.3	Circuito considerando um APLC no PAC $m=3$ . . . . .	33
3.4	Circuito considerando um APLC no PAC $m=4$ . . . . .	34

3.5	Gráfico exemplo da soluções do problema com mais de um APLC. A solução apresenta vários mínimos locais, destacados com os círculos. . . . .	38
3.6	Ilustração dos passos do GA. Uma população é criada a partir de cromossomos, essa população é modificada sucessivamente pelos operadores <i>crossover</i> e mutação para o ponto ótimo. . . . .	40
3.7	Ilustração da movimentação de uma partícula $XP$ de um ponto inicial até o ponto ótimo. $XP$ é guiada pela soma com a velocidade $VP$ , que guia a partícula para o ponto mais viável. . . . .	42
3.8	Abelhas exploradoras, procuram comida no espaço de busca. Abelhas operárias, coletam comida nas fontes já exploradas por elas mesmas e transmitem a informação de viabilidade (dança) as abelhas seguidoras. Abelhas seguidoras, esperam a dança das abelhas operárias, e seguem para a fonte de comida mais viável. . . . .	44
3.9	Representação de múltiplos cenários. No caso existem três cenários, A, B e C. Três localizações foram consideradas, mas no cenário A, ponto de acoplamento comum (PAC) 2 não satisfaz as restrições de distorção harmônica. Portanto, PAC 3 é o melhor ponto de instalação, pois somando os três cenários é o que apresenta menor $i_Q(I_{sc})$ . . . . .	47
3.10	Vetor composto com as variáveis de decisão. . . . .	48
3.11	SEP de 18 barras da IEEE . . . . .	50
3.12	Todos os cenários do SEP são simulados considerando carga máxima permitida em cada PAC. Cada ciclo de tensão ( $\mathcal{V}_{sc}(t) = [v_{PCC_1}(t), \dots, v_{PCC_{16}}(t)]$ ) é exportado para o algoritmo que, a partir da DFT janelada, transforma a tensão no tempo para frequência resultando em um vetor multidimensional $\mathcal{V}$ . . . . .	51
3.13	Forma de onda das correntes obtidas resolvendo problema de otimização sem considerar nenhum tipo de restrição. A forma de onda da corrente é dada por $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H  I_{(m,h)}  \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ . . . . .	53
3.14	Forma de onda das correntes obtidas resolvendo problema de otimização considerando restrições de corrente e THD. A forma de onda da corrente é dada por $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H  I_{(m,h)}  \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ . . . . .	55
3.15	Número de iterações para obtenção das soluções considerando: a) corrente contínua e b) corrente quantizada. . . . .	58

3.16	Gráfico comparativo do nível de THD antes e depois da compensação. . . . .	64
3.17	Gráfico comparativo do nível de HTLL antes e depois da compensação. . . . .	64
3.18	Gráfico do nível de IF dos APLCs em comparação com a corrente referência da carga. . . . .	65
3.19	Gráfico comparativo dos índices de qualidade de energia antes e depois da compensação dos APLCs. . . . .	67
3.20	Gráfico comparativo dos índices de qualidade de energia antes e depois da compensação dos APLCs. . . . .	68
4.1	Diagrama de blocos simplificado da obtenção da corrente de referência do APLC com controle de ganho. . . . .	71
4.2	Circuito do SEP e diagrama de blocos dos controles cooperativos com ajuste de ganho. . . . .	71
4.3	Circuito equivalente da influência da corrente de compensação na tensão do PAC. . . . .	72
4.4	Diagrama de blocos do controle por detecção de tensão. . . . .	73
4.5	Diagrama de blocos do controle por detecção de tensão. . . . .	73
4.6	Circuito simplificado do modelo da planta, considerando a) a tensão fundamental, b) a fonte de corrente harmônica. . . . .	74
4.7	Diagrama de blocos do estimador com filtro $H_f$ , (ASTROM e WITTENMARK, 1995). . . . .	75
4.8	Circuito equivalente de controle considerando a influência entre dois APLCs. . . . .	77
4.9	Diagrama de controle considerando a influência entre dois APLCs. . . . .	78
4.10	Diagrama de blocos de controle para cálculo da referência da corrente do compensador, em que $\phi = \arctan \left( \frac{V_{(h)}^{Im}}{V_{(h)}^{Re}} \right)$ . . . . .	82
4.11	Controle da corrente harmônica, , em que $\phi = \arctan \left( \frac{V_{(h)}^{Im}}{V_{(h)}^{Re}} \right)$ . . . . .	82
4.12	Diagrama do controle de IHD. . . . .	85
4.13	Diagrama do controle de THD. . . . .	86
4.14	Diagrama de controle com as funções de transferência obtidas. . . . .	87
4.15	Característica de decaimento entre corrente harmônica do APLC e tensão do PAC. . . . .	88
4.16	Diagrama do controle suplementar. . . . .	88

4.17	Deslocamento da reta de decaimento. . . . .	89
4.18	Diagrama da coordenação dos APLCs. . . . .	89
4.19	Máquina de estado finito para o autômato do SG. . . . .	91
4.20	Fluxograma para determinar as THDs de referência para os APLCs. . . . .	93
4.21	Representação simplificada do SEP de referência de 18 PACs (GRADY et al., 1991). . . . .	96
4.22	As respostas para: a) $z_{(7,7,5)}$ , b) $z_{(24,7,5)}$ e c) $z_{(24,24,5)}$ são apresentadas. Linha contínua: resposta identificada. Linha pontilhada: resposta identificada. . . . .	98
4.23	Respostas medidas e identificadas, considerando como entrada: a) corrente senoidal, $h=5$ , nos PAC 7 e 24; b) corrente senoidal $h=[5, 7]$ , nos PAC 7. . . . .	99
4.24	Resposta ao degrau com diferentes ganhos para malha fechada, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro. . . . .	100
4.25	Resposta de bode com diferentes ganhos para malha fechada, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro. . . . .	100
4.26	Resposta de bode com diferentes ganhos da sensibilidade, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro. . . . .	101
4.27	Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que a carga varia em $t=0,85$ s. Vermelho: referência, Azul: $THD_{(7)}$ e Verde: $THD_{(24)}$ . . . . .	101
4.28	Resultados da influência da variação de carga. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$ a $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$ a $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$ a $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) regime permanente das tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD. . . . .	102
4.29	Resultados da influência da variação de carga no tempo. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$ a $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$ a $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$ a $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos $kgI$ e d) ganhos $\Delta I^*$ . . . . .	103
4.30	Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, no chaveamento de dois bancos de capacitores em $t=0,85$ s. Vermelho: referência, Azul: $THD_{(7)}$ e Verde: $THD_{(24)}$ . . . . .	104

- 4.31 Resultados da influência do chaveamento de capacitores no tempo. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD. . . . . 105
- 4.32 Resultados da influência do chaveamento de capacitores. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ . . . . . 106
- 4.33 Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que o regulador de tensão é conectado em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ . . . . . 107
- 4.34 Resultados da influência da conexão do regulador de tensão. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD. 108
- 4.35 Resultados da influência da conexão do regulador de tensão. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ . . . . . 109
- 4.36 Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que a DG é conectado em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ . . . 110
- 4.37 Resultados da influência da conexão da DG. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD. . . . . 110

4.38	Resultados da influência da conexão da DG. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$ a $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$ a $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$ a $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos $kgI$ e d) ganhos $\Delta I^*$ . . . . .	111
4.39	CCM com detecção pela corrente da carga, o APLC opera com rejeita harmônicos. (a) Tensão no PAC (V). (b) Corrente do SEP (A). (c) Corrente do APLC (A). . . . .	112
4.40	THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC por CCM da corrente da carga. . . . .	113
4.41	CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, variação do ganho automático (JINTAKOSONWIT et al., 2003). (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.). . . . .	114
4.42	CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, variação do ganho por decaimento v. (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.). . . . .	114
4.43	THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC com ganho automático, (JINTAKOSONWIT et al., 2003). . . . .	115
4.44	THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC com ganho por decaimento, (LEE e CHENG, 2007). . . . .	115
4.45	CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, com variação do ganho com o controle proposto. (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.). . . . .	116
4.46	THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC por CCM da tensão do PAC com variação do ganho com o controle proposto. . . . .	117
4.47	Representação simplificada sob falta entre os PACs 23 e 24. . . . .	118
4.48	Resultados antes ( $t < 1,25$ s) e depois da falta ( $t > 1,25$ s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia sem comunicação de (JINTAKOSONWIT et al., 2002). . . . .	119

4.49	Resultados antes ( $t < 1,25$ s) e depois da falta ( $t > 1,5$ s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia com comunicação de (JINTAKOSONWIT et al., 2003). . . . .	120
4.50	Resultados antes ( $t < 1,25$ s) e depois da falta ( $t > 1,25$ s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia sem comunicação de (LEE e CHENG, 2007). . . . .	120
4.51	Resultados antes ( $t < 1,25$ s) e depois da falta ( $t > 1,25$ s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia proposta sem comunicação. . . . .	121
4.52	Variação da THD sem o APLC. . . . .	122
4.53	Variação da THD sem controlador supervisorio com ajuste de ganho automático.123	
4.54	Variação da THD sem controlador supervisorio com ajuste de ganho por <i>droop</i> .124	
4.55	Variação da THD sem controlador supervisorio com ajuste de ganho por proposto. . . . .	125
4.56	Variação da THD com controlador supervisorio com controle de (GEHRKE et al., 2012a). . . . .	126
4.57	Variação da THD com controlador supervisorio com ajuste de ganho automático.127	
4.58	Variação da THD com controlador supervisorio com ajuste de ganho por <i>droop</i> .128	
4.59	Variação da THD com controlador supervisorio com ajuste de ganho proposto.129	
5.1	Circuito simulado. . . . .	131
5.2	Circuito experimental. . . . .	132
5.3	HIL com controle no RT-LAB e simulação do inversor e motor no MATLAB. 133	
5.4	HIL com DG e SEP emulados no RTDS <sup>®</sup> e controle no MATLAB. . . . .	134
5.5	Primeiro PHIL proposto, utilizando o RTDS <sup>®</sup> para emular o SEP e uma plataforma real com inversor e motor. . . . .	134
5.6	Plataforma flexível, permitindo diferentes conexões entre, controlador (dSPACE), sistema real (inversores e cargas) e emulação em tempo real (RTDS <sup>®</sup> ).135	
5.7	PHIL proposto para a aplicação em compensação de harmônicos. . . . .	136
5.8	HIL com controle de um APLC em DSP e emulação do compensador e rede no RTDS <sup>®</sup> . Fonte:(XIAOPIN et al., 2010). . . . .	136



5.9	<i>Delay</i> apresentado no HIL entre corrente de referência, $i_f^*$ e corrente de compensação, $i_f$ . . . . .	137
5.10	Diagrama da estrutura inversor/controlador que utiliza o OPAL-RT como controlador. . . . .	137
5.11	Problemas de sincronismo no chaveamento digital. . . . .	138
5.12	Sistema proposto do HIL. . . . .	138
5.13	Circuito simplificado para representar a implementação do SEP e conversor no OPAL interagindo com os DSPs. . . . .	139
5.14	Interfaces entre DSP e OPAL. . . . .	140
5.15	Circuito emulador no simulador em tempo real. O SEP é o mesmo utilizado para as simulações, o APLC são conversores controlados por PWM, que são gerados pelo DSP e recebidos pelo EventDetector. As cargas são conectadas nos PCCs 5, 7 e 24, e podem variar a potência por um ganho $a$ de 0 a 1. O condicionamento amplifica o sinal em p.u. para os níveis de operação do DSP. . . . .	141
5.16	Tensão, $v_7$ , (CH1-amarelo): 500 mV/div; a corrente do APLC, $i_{f_7}$ , (Corrente (CH2-verde): 50 mV/div; e a THD, (CH3-rosa): 5V/div; Tempo: 10ms/div). a) Transitório da operação do APLC, b) Antes da compensação e c) depois da compensação. . . . .	142
5.17	Tensão, $v_{24}$ , (CH1-amarelo): 500 mV/div; a corrente do APLC, $i_{f_{24}}$ , (Corrente (CH2-verde): 50 mV/div; e a THD, (CH3-rosa): 5V/div; Tempo: 10ms/div). a) Transitório da operação do APLC, b) Antes da compensação e c) depois da compensação. . . . .	143
B.1	Controle de um gerador no SEP. . . . .	157
B.2	Gráfico da variação da potência de saída dos geradores com uma variação de carga. . . . .	157
B.3	Mudança das características de frequência em relação a potência para um gerador. . . . .	158
B.4	Controle de geradores no SEP. . . . .	159

# Lista de Símbolos

$aTHD$	distorção harmônica total média ( <i>average Total Harmonic Distortion</i> ) (unidade: %)	
$C$	capacitor	[F]
$CBF$	melhor viabilidade do <i>swarm</i>	
$d$	nível de inviabilidade	
$\delta I$	resolução da amplitude da corrente quantizada	
$\delta t$	resolução do ângulo da corrente quantizada	
$dim$	dimensão da matriz/vetor	
$\Delta I^*$	referência de carga para corrente de compensação	
$\Delta P^*$	referência de carga para geradores	
$EC$	restrição de igualdade	
$f$	frequência	[Hz]
$f_{sw}$	frequência de chaveamento	[Hz]
$f_s$	frequência de amostragem	[Hz]
$FvG$	função de viabilidade	
$GBF$	melhor viabilidade global	
$h$	número da ordem do harmônico	

---

$\text{Im}$	parte imaginária	
$I$	corrente de compensação do APLC calculada	[A]
$IC$	restrição de desigualdade	
$I_{DG}$	corrente da geração distribuída	[A]
$i_f$	corrente medida do APLC	[A]
$i_f^*$	corrente de referência do APLC	[A]
$I_l$	corrente da carga (unidade: A)	
$IF$	corrente de compensação	[A]
$iter$	número da iteração atual	
$iterM$	número máximo de iterações	
$j$	número da restrições de igualdade	
$J_j$	máximo número de restrições de igualdade	
$k$	número do barramento	
$k_{gT}$	fator de minimização da THD	
$k_{gI}$	fator de minimização da IHD	
$k_v$	ganho automático	
$l$	número de restrições de desigualdade	
$L$	indutor	[H]
$La$	função Lagrangeana	
$Lc$	função Lagrangeana para o problema com restrição de corrente	
$\lambda$	multiplicador de Lagrange para EC	
$L_f$	indutor de acoplamento do APLC	

---

$L_l$	máximo número de restrições de desigualdade	
$\mu$	multiplicador de Lagrange para IC	
$Lu$	função Lagrangeana para o problema sem restrição	
$m$	ponto de instalação do APLC	
$m_a$	índice de modulação	
$M$	máximo número de pontos para instalação de APLCs	
$mTHD$	máxima distorção harmônica total ( <i>Maximum Total Harmonic Distortion</i> )	(%)
$mIHD$	máxima distorção harmônica individual ( <i>Maximum Individual Harmonic Distortion</i> )	(%)
$n$	tempo discreto	
$N_d$	período do sinal discreto	
$N$	máximo número de barramentos	
$N_v$	inviabilidade	
$OF$	função objetivo	
$p$	posição de análise do vetor de variáveis de decisão	
$pop$	população do GA	
$q$	número de APLCs	
Re	parte real	
$R$	resistor	[ $\Omega$ ]
$R_i$	regulador de corrente	
$sc$	número do cenário analisado	
$scM$	máximo número de cenários analisados	
$s_d$	sinal discreto	

---

$V$	tensão medida no PAC	[V]
$v_f^*$	tensão de referência do APLC	[V]
$V_c$	tensão compensada calculada	[V]
$V_{dc}$	tensão medida do barramento CC	[V]
$v_{DG}$	tensão do gerador distribuído	[V]
$v_f^*$	tensão de referência do APLC	[V]
$v_l$	tensão da carga	[V]
$VP$	velocidade de PSO	
$x$	variáveis de estado	
$X$	sinal discreto complexo	
$XG$	cromossomo do GA	
$XP$	partícula de PSO	
$Z$	impedância da linha do SEP	[ $\Omega$ ]
$Z_s$	impedância série do APLC	[ $\Omega$ ]
$Z_p$	impedância paralela do APLC	[ $\Omega$ ]
$\mathfrak{S}$	conjunto de amplitudes da corrente quantizada	
$\mathfrak{N}$	conjunto de ângulos da corrente quantizada	

# Glossário

<b>ABC</b>	colônia artificial de abelhas ( <i>Artificial Bee Colony</i> )
<b>ADC</b>	conversor analógico-digital ( <i>Analogic-Digital Converter</i> )
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>APLC</b>	compensador ativo de potência ( <i>Active Power Line Conditioner</i> )
<b>CC</b>	corrente contínua
<b>CCM</b>	método de controle por corrente ( <i>Current Control Method</i> )
<b>DAC</b>	conversor digital-analógico ( <i>Digital-Analogic Converter</i> )
<b>DFT</b>	transformada discreta de Fourier ( <i>Discrete Fourier Transform</i> )
<b>DG</b>	geração distribuída ( <i>Distributed Generation</i> )
<b>DSP</b>	<i>Digital signal processing</i>
<b>FACTS</b>	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
<b>FPGA</b>	<i>Field-programmable gate array</i>
<b>GA</b>	algoritmos genéticos ( <i>Genetic Algorithm</i> )
<b>HIL</b>	<i>Hardware-in-loop</i>
<b>HTLL</b>	perdas harmônicas nas linhas ( <i>Harmonic Transmission Line Losses</i> )
<b>IHD</b>	distorção harmônica individual ( <i>Individual Harmonic Distortion</i> )
<b>KKT</b>	condições de Karush-Kuhn-Tucker

---

<b>MB</b>	múltiplos barramentos
<b>MH</b>	múltiplos harmônicos
<b>MLL</b>	perdas de torque em motores ( <i>Motor Load Losses</i> )
<b>MPPT</b>	rastreamento do ponto de potência máxima ( <i>Maximum Power Point Tracking</i> )
<b>PAC</b>	ponto de acoplamento comum
<b>PHIL</b>	<i>Power Hardware-in-loop</i>
<b>PI</b>	controlador proporcional-integral
<b>PLL</b>	<i>Phase-Locked Loop</i>
<b>PSO</b>	otimização por enxames de partículas ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
<b>p.u.</b>	por unidade
<b>PV</b>	fotovoltaico ( <i>Photovoltaic</i> )
<b>PWM</b>	modulação por largura de pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
<b>RTDS<sup>®</sup></b>	simulador digital de tempo real ( <i>Real-Time Digital Simulator</i> )
<b>RTHDM</b>	método de detecção de harmônicos em tempo real ( <i>Real-Time Harmonic Detection Method</i> )
<b>RTW</b>	ferramenta de tempo real ( <i>Real-Time Workshop</i> )
<b>SG</b>	supervisório global
<b>SL</b>	supervisório local
<b>SEP</b>	sistema elétrico de potência
<b>SVC</b>	<i>Static Var Compensator</i>
<b>THD</b>	distorção harmônica total ( <i>Total Harmonic Distortion</i> )
<b>TIF</b>	fator de influência de telefone ( <i>Telephone Influence Factor</i> )

# Resumo

O trabalho propõe uma solução de localização, dimensionamento e controle de *Active Power Line Conditioners* (APLC)s em rede de distribuição. A solução de localização e dimensionamento é ótima independente do perfil da carga, desde que o sistema não exceda a potência máxima considerada para cada PAC. O problema de otimização foi solucionado com restrição de distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*) (THD) e distorção harmônica individual (*Individual Harmonic Distortion*) (IHD), com mínimas perdas, mínima corrente e mínima quantidade de compensador ativo de potência (*Active Power Line Conditioner*) (APLC)s. Restrições de distorção harmônica garantiram que a norma IEEE-519 fosse satisfeita, e restrições de corrente garantiram dimensionamento e correntes compatíveis com implementações reais. Resultados de simulação demonstraram a viabilidade da solução proposta assim como suas características distintas em comparação outros métodos. Uma análise de estabilidade em relação aos pontos de instalação mostrou que com a estratégia de uma fonte de corrente controlada com detecção de tensão e um projeto adequado, o sistema é estável independente da variação de elementos de potência. O controle também atua nas restrições de THD e IHD e divide a potência entre os APLCs sem nenhuma comunicação. Tanto a localização como o controle foram testados em uma plataforma de tempo real, demonstrando a viabilidade da solução.

Palavras-chave: qualidade de energia, distorção harmônica, métodos de otimização, controle distribuído, compensadores ativos de potência



# Abstract

This paper proposes a method for allocating and sizing multiple current-constrained active power line conditioners (APLCs) in power distribution networks. The location and size of the APLCs are optimal with respect to the power distribution topology regardless the load consumption profile as long as the distributed power demand does not exceed the power rating at each one of the points of common coupling (PCC). The optimization problem is stated in terms of the total harmonic distortion (THD) and the individual harmonic distortion (IHD) observed at each PCC and takes into account constraints like minimum line losses, minimum compensation current and minimum quantity of APLC units. The constraints aims at satisfying specific power quality requirements like the ones prescribed in IEEE 519-1992. Simulation results are presented to demonstrate the feasibility of the proposed approach as well as to emphasize its distinct features in comparison with similar and well known methods. The stability analysis ensured that the optimal points are stable for the controlled current source based on voltage detection regardless the power elements variation. The APLCs control operates to damp THD and IHD constraints cooperating with each other without any communication. All studies, location, sizing and control, were tested in a real time platform and proved to be feasible.

Keywords: power quality, harmonic distortion, optimization methods, power distribution control, active filters

# 1

## Introdução Geral

O sistema elétrico de potência (SEP) é formado por unidades de geração (usinas hidrelétricas, usinas nucleares, fazendas eólicas, centrais fotovoltaicas, entre outras), linhas de transmissão e ramais de distribuição, possibilitando que os consumidores tenham acesso a energia elétrica. Os ramais de distribuição são compostos basicamente por segmentos de linhas (trechos entre um ponto de acoplamento comum (PAC) e outro) e cargas. As cargas deveriam ser alimentadas com tensões senoidais de amplitude e frequência constante. Entretanto, a tensão de alimentação é distorcida por diferentes fatores: os segmentos de linhas apresentam perdas ôhmicas e conseqüentemente reduzem o nível de tensão; as cargas dos consumidores, apresentam natureza reativa e não linear, o que reduz o fator de potência e aumenta as perdas; as correntes harmônicas distorcem a forma da onda de tensão.

Devido a esses fatores, o SEP apresenta distorções, no qual a tensão apresenta uma forma de onda com harmônicos, variação da amplitude e baixo fator de potência. A baixa qualidade da energia elétrica resulta em operação com baixa eficiência, perdas e paradas de equipamentos, acionamento errôneo dos sistemas de proteção e medições equivocadas dos instrumentos de medição, totalizando perdas econômicas para o SEP. Para proteger os equipamentos e melhorar a qualidade de energia, normas voltadas a consumidores e concessionárias foram estabelecidas por entidades reguladoras.

Para os consumidores, as normas definem o fator de potência mínimo de operação e o nível de harmônicos que esses podem injetar no SEP, (IEC61000-3-2, 1995) e (IEC61000-3-4,

1998). As normas direcionadas as concessionárias definem os níveis de tensão e frequência nominais no PAC. A norma nacional, (PRODIST, 2009), e as normas internacionais, (IEEE-STD.519, 1993) e (EN-50160, 1999), definem além dos limites de amplitude e frequência, limites de distorção harmônica individual (*Individual Harmonic Distortion*) (IHD) e distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion*) (THD).

Convencionalmente, filtros passivos LC foram utilizados para compensação do fator de potência e minimização dos harmônicos, contudo, nesse tipo de solução, a capacidade de compensação é limitada, a resposta dinâmica é lenta, e há possibilidade de ressonância, além disso o volume do equipamento é relativamente elevado. Com a evolução da eletrônica potência e a disseminação do uso de fontes renováveis, as alternativas com filtros ativos de potência e geração distribuída (*Distributed Generation*) (DG) começam a ser estudados para satisfazer as normas e melhorar a qualidade de energia. Estudos e implementações de filtros ativos de potência vêm sendo desenvolvidos desde a década de 70 (GYUGYI e STRYCUDA, 1976), sendo atualmente uma solução comercial de vários fabricantes. Filtros ativos são compostos por conversores estáticos, cuja ação de controle visa suprimir harmônicos de corrente e/ou tensão presentes no circuito onde os mesmos estão instalados. Diferente das soluções com filtros passivos, os filtros ativos geralmente operam em malha fechada, auto regulando-se às condições dinâmicas observadas nas redes de distribuição. Os filtros ativos podem ser classificados em compensadores série, paralelo, híbrido e universal. O compensador utilizado na distribuição para minimização de harmônicos é denominado como compensador ativo de potência (*Active Power Line Conditioner*) (APLC) e opera como filtro ativo paralelo atuando como fonte de corrente.

As diversas funcionalidades, associadas aos APLCs no sentido de aumentar a qualidade de energia do SEP, têm despertado o interesse na compreensão e utilização eficiente dessa tecnologia. Do ponto de vista da eletrônica de potência, o objetivo é a compensação local, em que o APLC seria instalado no PAC com uma carga instalada, de forma a eliminar todos os harmônicos ou de forma seletiva, ou seja, eliminar somente harmônicos selecionados. Dessa forma, para a compensação de harmônicos em um SEP com vários PACs e cenário dinâmico, em que as cargas são conectadas e desconectadas de modo aleatório e a potência consumida por essas, quando conectadas, pode variar ao longo do tempo, seriam necessários tantos APLCs quantos PACs existissem no SEP. A capacidade de compensação local dos APLCs

a serem instalados seria determinada pelo cenário mais severo, em termos de potência e distorção harmônica, no qual, tanto o custo, quanto a potência de compensação, cresceriam com a quantidade de PACs do SEP.

A partir da solução de compensação local apresentada, teoricamente, todos os PACs apresentariam valores de THD de tensão e corrente próximos a zero, em que cada compensador local opera de forma a eliminar os harmônicos no PAC. Contudo, do ponto de vista da eletrônica de potência, não é analisado o impacto que isso pode resultar nos demais PACs, pois considera-se que a carga é conectada a um barramento infinito, com uma fonte ideal e impedância nula. Analisando do ponto de vista do SEP, nota-se que os segmentos de linhas são compostos com baixas impedâncias, consistindo basicamente por componentes passivos, resistor ( $R$ ), indutor ( $L$ ) e capacitor ( $C$ ), ou seja, quando um APLC é instalado em um PAC, esse injeta uma corrente de compensação, que atua diretamente nos harmônicos de tensão no local de instalação e que também se propaga pelas impedâncias das linhas influenciando os demais PACs. Assim, pode-se concluir que um ou mais APLCs poderiam ser removidos e a distorção harmônica nos PACs, sem uma unidade de compensação, podem ser compensados pelos APLCs dos PACs vizinhos. Logo, seria possível reduzir o número de APLCs, reduzindo custos.

Considerando que somente PACs selecionados possuem APLCs instalados, acarreta que os harmônicos não sejam eliminados, e sim, minimizados. Entretanto, de acordo com normas nacionais e internacionais o nível THD de tensão nos PACs não precisa ser igual a zero, como sugere a compensação local, mas sim, abaixo de um limite regulamentado. Dessa forma, a solução do ponto de vista do SEP, além de reduzir o número de unidades APLCs, opera com potência mínima para satisfazer a norma, sendo que, otimizando a potência das unidades, as perdas também são minimizadas.

A solução de redução de unidades de APLCs apresenta um problema de como determinar os PACs nos quais é necessário instalar APLCs, considerando que há dinâmica de variação de carga e que quando instalados os APLCs não podem mudar o ponto de instalação, ou seja, enseja um problema de localização dos APLC e seleção de cenários para que esses pontos de instalação sejam determinados. A solução de otimização de potência remete a questão de como calcular a potência de compensação ótima que cada unidade deve operar para manter a THD nos valores regulamentados, visto que o controle local utiliza como referência a corrente

da carga ou da rede, mas não possui nenhum parâmetro para detectar o nível de THD e que a potência da carga no PAC em que o APLC está instalado muda dinamicamente. Nesse sentido, são identificados três problemas, o de dimensionamento da potência do APLC, bem como, o controle e coordenação das unidades instaladas.

## 1.1 Objetivos

De acordo com o exposto, os objetivos gerais do trabalho para a solução de minimização de harmônicos e aumento da qualidade de energia são: localizar, dimensionar, coordenar e controlar APLCs em uma rede de distribuição.

Para atingir os resultados esperados o trabalho tem como objetivos específicos para a localização e dimensionamento:

- escolher um SEP base; (topologia de rede e impedâncias de linha)
- estudar a melhor metodologia para obtenção de cenários;
- definir os dados de entrada do algoritmo;
- definir o modelo de APLC;
- formular e resolver um problema de otimização com restrições para determinar a localização ótima do sistema de compensação;
- avaliar algoritmos ótimos para melhor solução do problema de localização e dimensionamento.

Para testar os algoritmos para o problema de localização e dimensionamento, uma topologia de ramal de distribuição deve ser adotada, na qual informações sobre impedâncias dos segmentos de linha e dados de variação de tensão possam ser obtidos. A variação de tensão caracteriza a variação de cargas, por isso deve ser estudada uma metodologia de obtenção de um conjunto de cenários, que quando somados caracterizam um conjunto de soluções viáveis (pontos ótimos) que satisfaçam as restrições e independam da variação de cargas. A partir dos dados do SEP e dos cenários, devem-se definir os dados base para a solução dos algoritmos.

Além dos dados do SEP, o modelo do APLC será implementado, caracterizando restrições de operação, restrições de potência, entre outros. O conjunto de características do APLC, juntamente com as restrições normativas e de operação do SEP, são compiladas para a formulação da função objetivo ( $OF$ ), que deve ser minimizada para que a solução do problema de localização e dimensionamento satisfaça a norma com mínima potência.

Uma boa formulação da  $OF$  pode ser aplicada a diferentes algoritmos de otimização, os quais apresentam diferentes desempenho. Neste trabalho, algoritmos já apresentados na literatura serão estudados e comparados, além disso, será proposta uma nova alternativa para solução da localização.

Para a coordenação e controle do APLCs, os objetivos específicos são:

- definir/implementar uma estratégia de controle;
- avaliar o gerenciamento de potência;
- avaliar a operação local e global.

Para definir a estratégia de controle a ser utilizada para compensar harmônicos, estratégias de controle de geradores e de conversores de potência conectados ao SEP são estudadas. A melhor estratégia será definida, permitindo que o compensador atue de forma global, satisfazendo o nível de harmônicos em todos os PACs e distribuindo potência entre os APLCs. Por fim, o controle local e centralizado (global) serão analisados separadamente para verificar a influência do controle.

De forma a verificar as localizações, dimensionamento e controle, pretende-se desenvolver uma plataforma de testes em tempo real, sendo possível emular SEPs complexos e interagir com o controle real dos APLCs.

## 1.2 Estrutura do documento

A estrutura, organização e conteúdo da tese é ilustrada na Figura 1.1 e explicada a seguir.

- Neste Capítulo 1, foi apresentada uma introdução da distorção da qualidade de energia em relação nível de tensão e harmônicos, a partir da qual, propõe-se o estudo da localização

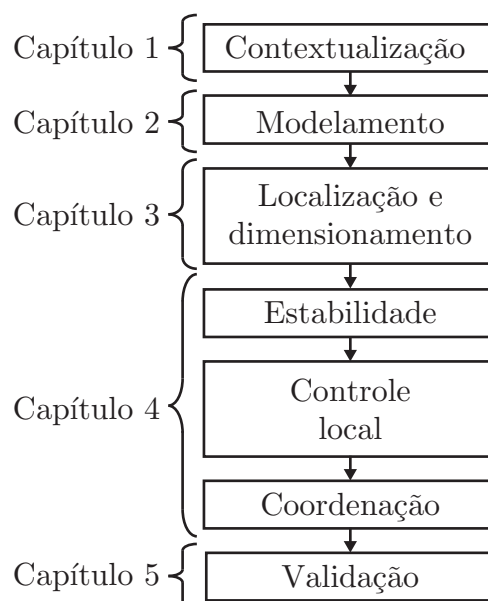


Figura 1.1: Planejamento da solução de localização, dimensionamento e controle de compensadores ativos apresentada na tese.

e dimensionamento de APLCs para mitigar os harmônicos, a fim de reduzir os efeitos indesejados tais como: interferências, mau funcionamento e queima de equipamentos, ressonância, entre outros.

- No Capítulo 2, é apresentado o modelamento do sistema proposto. Para uma análise das estratégias apresentadas, todos os elementos do sistema de potência são modelados e as equações fundamentais da localização e controle são determinadas. Nota-se que esses são necessários na falta de dados reais do sistema.

- No Capítulo 3, a formulação do problema e suas restrições para a determinação do ponto ótimo para a instalação dos APLCs é proposta, analisando a planta como projeto inicial e sem elementos de compensação do sistema de potência. Soluções para a formulação proposta são apresentadas, incluindo três algoritmos de otimização: um método tradicional baseado em gradiente e condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) e métodos heurísticos (algoritmos genéticos (*Genetic Algorithm*) (GA), otimização por enxames de partículas (*Particle Swarm Optimization*) (PSO) e colônia artificial de abelhas (*Artificial Bee Colony*) (ABC)). Por fim, é realizada uma análise dos algoritmos.

- No Capítulo 4, a estabilidade dos pontos em que os APLCs estão instalados é avaliada, caso não, acrescenta uma restrições de PAC e estuda a localização e dimensionamento novamente. Também apresenta-se uma solução de controle distribuído para APLCs instalados

em um mesmo SEP, minimizando harmônicos para satisfazer ambos os índices de qualidade das normas em todos os PAC e distribuindo potência entre os compensadores. Para a distribuição da potência, implementou-se uma unidade supervisória de coordenação, objetivando a solução global. A análise dos resultados é feita para a operação local e global, com a influência de elementos do sistema de potência, além disso, verificou-se o comportamento dos APLCs com o SEP sob faltas.

- No Capítulo 5, é apresentada uma plataforma em tempo real, que foi desenvolvida para emular um SEP e interagir com o controle de APLCs. Dessa forma, analisar a localização, dimensionamento e controle propostos.

- No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

### 1.3 Simbologia

Como neste trabalho são apresentadas muitas variáveis, para melhor compreensão desse, nesta seção, é apresentada a forma que a simbologia que será utilizada.

Símbolos compostos: para representar uma tensão específica, por exemplo, a tensão compensada, é utilizado  $V$  para denominar tensão e um marcador, assim tem-se  $V_c$ . As demais variáveis de tensão, e de outros tipos, seguem o mesmo padrão.

Índices de matrizes: como são utilizadas matrizes de ordem  $n \times n \times n \times n$ , são muitos índices para uma mesma variável, portanto, quando uma variável compõem uma matriz, ou uma determinada posição, um índice é colocado entre parênteses. Por exemplo, uma tensão compensada no PAC  $k$ , no harmônico de ordem  $h$  é declarada como  $V_{c(k,h)}$ .

Variação de tempo discreto: a variação de tensão é a diferença do instante anterior para o instante atual, por exemplo,  $\Delta V = V_{[n]} - V_{[n-1]}$

Marcação sobrescritas: uma vez que o SEP é composto por potência reativa e ativa, algumas variáveis são calculadas na forma complexa, dessa forma é necessário identificar a parte real e parte imaginária de cada variável. Por exemplo, a tensão medida é  $V = V^{\text{Re}} + jV^{\text{Im}}$ , os marcadores foram colocados com sobrescrito, Re real e Im imaginário. Também é utilizado marcação sobrescrita para determinar quais variáveis são referência. Por exemplo,



corrente de compensação do APLC,  $i_f^*$ .

## 1.4 Principais contribuições

1. Solução para instalação e dimensionamento ótimo de APLCs, mitigando os harmônicos do SEP para satisfazer limites regulamentados por normas e reduzir perdas com mínima corrente. Destacam-se na metodologia a utilização de resultados com APLCs comerciais, destacando as restrições de sintetização da corrente de acordo com os parâmetros e operação desses, apresentar uma solução para solução de múltiplos cenários e aplicar um novo algoritmo heurístico a solução de localização e dimensionamento.
2. Controle distribuído de APLCs que atua em SEP com cenários dinâmicos com operação ótima, operando cooperativamente com as outras unidades e aumentando confiabilidade e estabilidade. No qual neste controle, uma analogia ao controle convencional de decaimento foi estudada e implementada, abrange dois índices de qualidades de energia e não necessita o conhecimento dos elementos do sistema de potência operando somente com dados de impedância e tensão dos PACs.
3. Coordenação de APLCs que calcula referências de THD em tempo real para uma compensação global, evitando a instalação de mais unidades.
4. Plataforma *Hardware-in-loop* (HIL) de testes que permita analisar em tempo real as melhores estratégias de controle de APLCs em SEP.

# 2

## Fundamentação

Neste capítulo, são apresentados os modelos fundamentais físicos, são definidas as variáveis de entrada e saída e as equações do sistema. Os modelos, as variáveis e as equações auxiliam no entendimento e na explicação dos objetivos do sistema proposto, explicitando restrições/limitações dos modelos e facilitando a implementação da localização e dos controladores locais e global.

Para determinar as equações de minimização e as equações de restrição é preciso definir o modelo do SEP, bem como, os índices de qualidade de energia que são afetados pelos harmônicos e as restrições impostas pelas normas. Para alcançar os objetivos do trabalho, na Figura 2.1 é apresentado um sistema exemplo para fundamentar as soluções, explicar a formulação e ilustrar a notação, que serão introduzidas neste trabalho. A representação simplificada do sistema é formada por um SEP simplificado, com diferentes elementos como cargas lineares e não lineares, APLCs entre outros. Esses elementos serão modelados nas próximas seções.

Barras: pontos de conexão entre segmentos de linha, cargas e compensadores, denominados PACs;

Cargas lineares e não lineares: representação das cargas que são instaladas no SEP, em que as lineares tem potência ativa ou reativa fixa, e as não lineares injetam harmônicos na rede;

APLC: representação do compensador instalado somente em alguns PACs, os quais serão

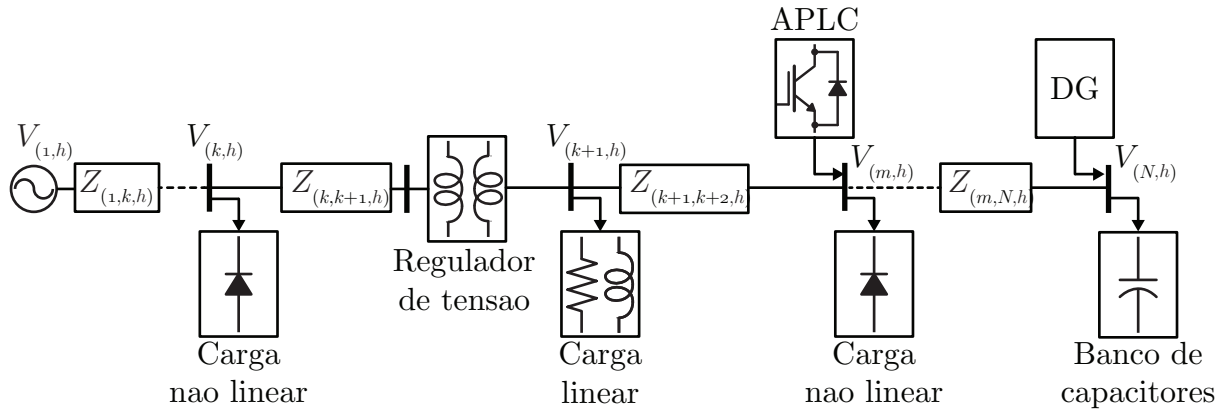


Figura 2.1: Diagrama unifilar simplificado do sistema proposto.

determinados pelo algoritmo de localização;

DG: representação da geração distribuída (*Distributed Generation*) instalada em alguns pontos do SEP, elevando a potência ativa onde estão instalados os geradores;

Regulador de tensão: representação do regulador de tensão, utilizado para aumentar o nível de tensão quando necessário;

Banco de capacitores: representação do banco de capacitores, utilizado para aumentar o nível de tensão quando necessário;

$V_{(.,.)}$ : tensão medida nos PACs;

$Z_{(.,.,.)}$ : impedância da linha do SEP que representa os segmentos de linha em  $\pi$ ;

$k$ : número do PAC, sendo  $k = 1, 2, \dots, N$ . Cada PAC representa um ponto de intersecção entre dois segmentos de linha, nesses PACs são conectadas cargas, APLCs etc.;

$m$ : ponto de instalação do APLC, considerando que mais de um APLC pode ser instalado em uma mesma rede,  $m = 1, 2, \dots, M$ ;

$h$ : número da ordem do harmônico, sendo  $h = 1, 2, \dots, H$ .

## 2.1 Modelo das cargas

Na rede distribuição existem cargas lineares e não lineares. As cargas lineares são representadas por resistores, potência ativa, e por indutores, potência reativa. As cargas não lineares são representadas por retificadores não controlados, Figura 2.2. A carga conectada

ao retificador pode ser um  $RC$  ou  $RL$ .

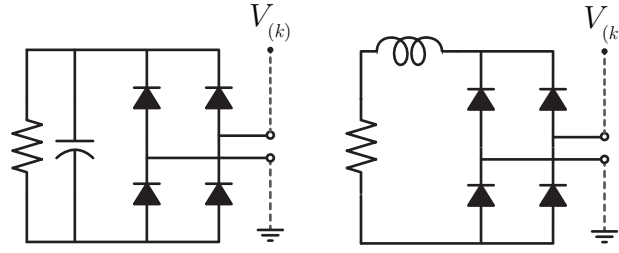


Figura 2.2: Representações simplificadas de carga não linear.

Para a linearização do modelo foram consideradas fonte ideais de corrente harmônica, Figura 2.3.

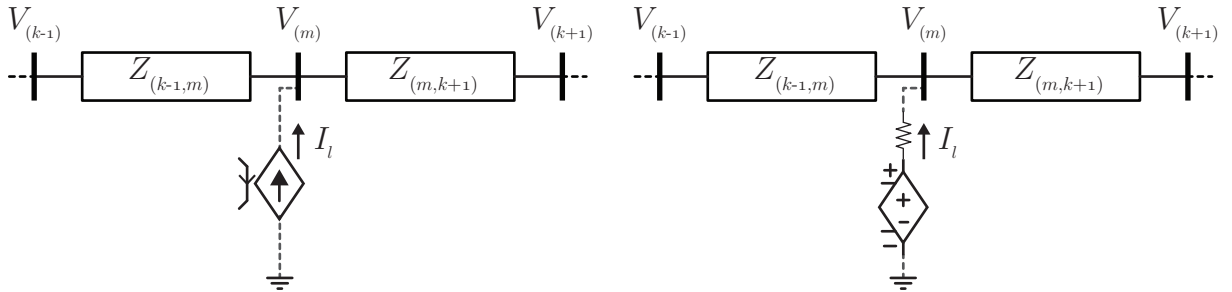


Figura 2.3: Representações das cargas não lineares como fonte ideal de corrente ou fonte de tensão harmônica.

## 2.2 Modelo do APLC

Como mencionado anteriormente, na formulação do problema de otimização, os APLCs foram representados como fontes de corrente controladas (em magnitude, frequência e fase), as quais minimizam os harmônicos de tensão como um compensadores paralelos. Esse modelo foi introduzido em (GRADY et al., 1991) e comprovado como melhor representação para APLCs instalados no SEP na análise de estabilidade em (AKAGI, 1997). Desta forma, a corrente de compensação pode ser representada como um vetor complexo, tal que:

$$I_{(m,h)} = I_{(m,h)}^{\text{Re}} + jI_{(m,h)}^{\text{Im}}, \quad (2.1)$$

enquanto a corrente eficaz por PAC é calculada baseada em (KEYPOUR et al., 2004):

$$I_{(m,H)} = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left[ I_{(m,h)}^{\text{Re}} \right]^2 + \left[ I_{(m,h)}^{\text{Im}} \right]^2}, \quad (2.2)$$

em que Re, é a parte real e, Im, é a parte imaginária.

### 2.2.1 Restrições do APLC

Neste trabalho, um modelo refinado com algumas restrições foi implementado. Nas Figuras 2.4(a) e 2.4(b) são ilustradas as representações da estrutura simplificada de um APLC, a partir dessa podem ser obtidos parâmetros que definem as restrições de operação do modelo do APLC.

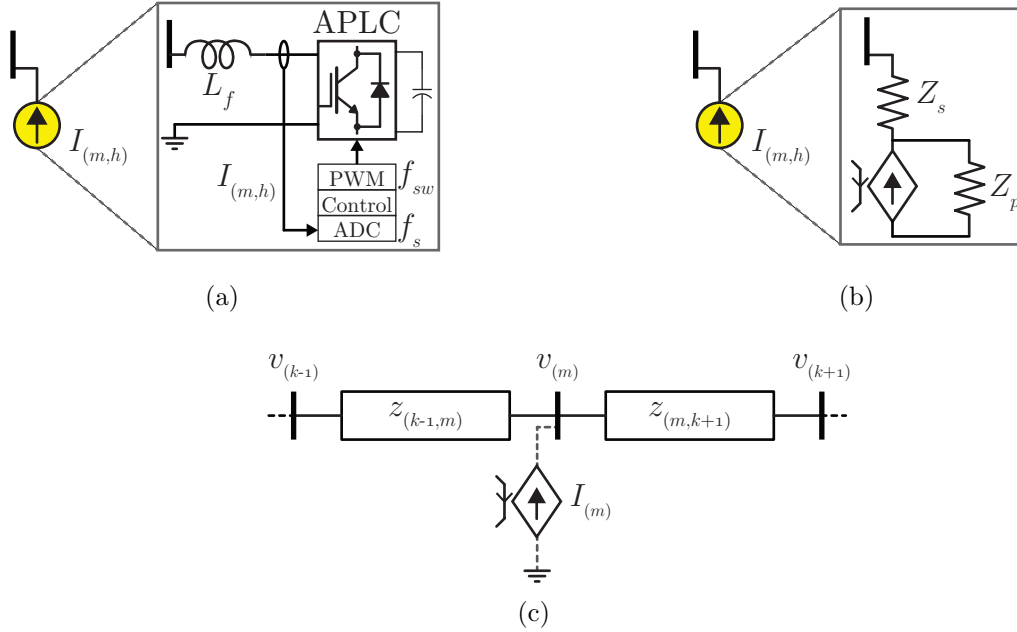


Figura 2.4: Representação simplificada (a) da implementação real do APLC, (b) da representação do APLC como fonte controlada e (c) da conexão desse com o SEP.

A primeira restrição é relacionada a corrente de compensação. A amplitude,  $\delta I$ , e ângulo de fase,  $\delta t$ , da corrente de compensação são consideradas como um conjunto finito de valores quantizados, i.e.,  $|I_{(m,h)}| \in \mathfrak{S}$  e  $\angle I_{(m,h)} \in \mathfrak{N}$  com resolução definida por  $\delta I$  e  $\delta t$ , respectivamente. Esses conjuntos são dados por:

$$\mathfrak{S} = \{I_{\min}, I_{\min} + \delta I, I_{\min} + 2\delta I, \dots, I_{\max}\}, \quad (2.3)$$

$$\mathfrak{N} = \{\theta_{\min}, \theta_{\min} + \delta\theta, \theta_{\min} + 2\delta\theta, \dots, \theta_{\max}\}. \quad (2.4)$$

A amplitude e ângulo de fase da corrente de compensação podem ser determinados utilizando os parâmetros do APLC. Existem duas maneiras de determinar  $\delta I$ : (i) a primeira baseada na indutância de conexão com a rede,  $L_f$ , a frequência de chaveamento,  $f_{sw}$ , e o

índice de modulação,  $m_a$ , sendo chamado de  $\delta I_1$ , Figura 2.5(b); (ii) o segundo é baseado na resolução do conversor analógico-digital (*Analogic-Digital Converter*) (ADC),  $ADC_{res}$ , sendo chamado de  $\delta I_2$ , Figura 2.5(c).

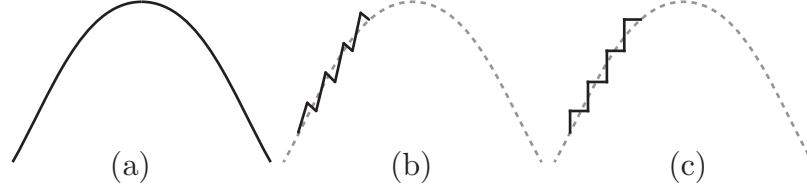


Figura 2.5: Meio ciclo da corrente de compensação: a) forma de onda ideal, b) forma de onda sintetizada pela corrente regulada do inversor de tensão, c) dados adquiridos pelo controle digital.

A primeira estimativa,  $\delta I_1$ , pode ser calculada por (XIAOLIN MAO e KRISHNA-MURTHY, 2009; GRANDI e LONCARSKI, 2013)

$$\delta I_1 = \frac{V_{pu}(1 - m_a)m_a}{(f_{sw}L_f)}, \quad (2.5)$$

O segundo,  $\delta I_2$ , pode ser calculado por

$$\delta I_2 = \frac{I_{pu}}{ADC_{res}}. \quad (2.6)$$

Baseado nessas estimativas, a resolução para o APLC é determinada por:

$$\delta I = f(\max(\delta I_1, \delta I_2)), \quad (2.7)$$

onde  $f(\cdot)$  é a função da resolução da magnitude possível, independente da presença de ruído e outros efeitos que também podem influenciar a mínima corrente sintetizada pelo APLC.

A resolução do ângulo de fase,  $\delta t$ , pode ser definido em termos da relação entre a frequência fundamental,  $f_{(1)}$ , e frequência de chaveamento do inversor de tensão,  $f_{sw}$ , dado por:

$$\delta\theta = 2\pi \frac{f_{(1)}}{f_{sw}}. \quad (2.8)$$

Outra restrição do APLC é a máxima frequência que o inversor pode sintetizar. Embora, não obrigatoriamente, para o presente estudo  $f_s = f_{sw}$ , i.e., a frequência de amostragem é igual a frequência de chaveamento do inversor. Portanto, para o presente trabalho, a máxima frequência, ou a maior ordem harmônica, é definida por:

$$H = \frac{f_s}{8f_{(1)}}. \quad (2.9)$$

As impedâncias série e paralela, Figura 2.4(b), representam os efeitos das impedâncias das chaves, dos indutores e dos capacitores. A impedância série,  $Z_s$ , é basicamente determinada pela indutância, uma vez que a impedância das chaves em condução é relativamente pequena, i.e.,  $Z_s = j2\pi f_{(1)}L_f$ . A impedância  $Z_s$  está em série com a impedância de linha quando vista pelo APLC. Como a impedância da linha é muito maior que  $Z_s$ , essa pode ser desconsiderada. A impedância paralela,  $Z_p$ , também pode ser desconsiderada, visto que tende ao infinito, quando as chaves estão abertas. Por fim, a corrente de compensação não tem nenhuma restrição específica em relação as impedâncias série e paralela.

## 2.3 Modelo da DG

A DG tem aumentado devido ao aumento da preocupação com alternativas de energias sustentáveis e com o incentivo de normas reguladoras. A DG, quando conectada à rede de distribuição, pode diminuir perdas na linhas pela proximidade à carga, além de outros benefícios.

A DG pode ser conectada a linha por um  $L$  ou por um filtro  $LCL$ , (SAMPAIO et al., 2012), podendo ser representada como uma fonte de corrente em paralelo,  $I_{DG}$ , como ilustra a Figura 2.6.

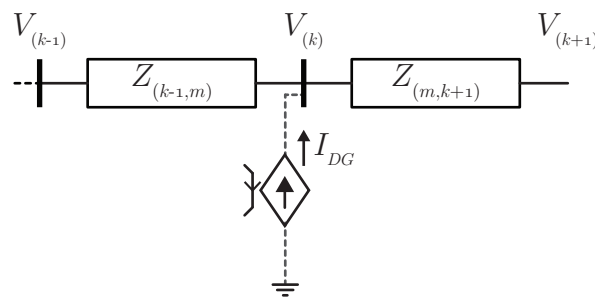


Figura 2.6: Representação da DG.

## 2.4 Modelo do regulador de tensão

Os reguladores de tensão também são conhecidos como condicionadores ou estabilizadores de tensão. Esses processam apenas um percentual da potência de carga e têm por objetivo compensar variações de tensão da rede elétrica, somando ou subtraindo um valor de tensão  $\Delta v$  para estabilizar a tensão de saída de acordo com uma referência pré-estabelecida.

A estrutura básica de um regulador pode ser representada por uma fonte de tensão em série com a linha. Nesse sentido, a representação é ilustrada na Figura 2.7.

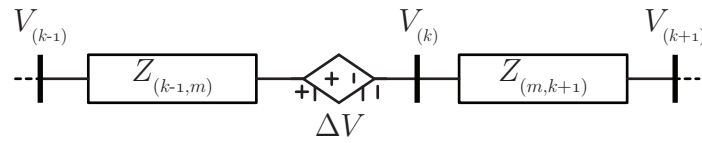


Figura 2.7: Representação do regulador de tensão.

## 2.5 Modelo do banco de capacitores

Bancos de capacitores são largamente utilizados em redes de distribuição para regular a tensão, principalmente, nos PACs do final da linha. Esses, além de aumentar o nível de tensão, influenciam na impedância do sistema e consequentemente no nível de THD de tensão. Os bancos de capacitores podem ser conectados e desconectados na rede e quando chaveados resultam em transitórios na rede, que podem desestabilizar a ação do APLC. Os bancos de capacitores são representados como ilustra a Figura 2.8.

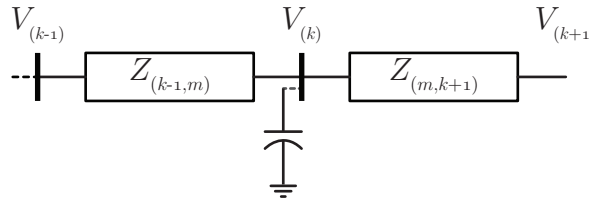


Figura 2.8: Representação do banco de capacitores.

## 2.6 Modelo do segmento de linha

Os sistemas de potência são representados por um conjunto de segmentos de linha conectados em série e em paralelo. Segundo (MARTINEZ et al., 2005), esses segmentos podem ser analisados por parâmetros concentrados ou parâmetros distribuídos. A seleção adequada do modelo depende, fundamentalmente, do comprimento da linha e da faixa de frequência a serem estudados. Este trabalho apresenta solução de harmônicos para redes de distribuição, em que os segmentos de linhas e os transitórios são pequenos. Dessa forma, para utilizar parâmetros distribuídos (modelo mais completo) seria necessário um passo de cálculo muito pequeno, o que acarretaria em alta complexidade computacional. No entanto, parâmetros



concentrados (modelo simplificado), para as características de redes de distribuição estudadas, apresentam resultado igual ou semelhante aos modelos mais complexos e menor complexidade computacional. Devido a esses fatores, neste trabalho os segmentos para formar o SEP são representados por parâmetros concentrados, conectados em  $\pi$ .

O modelo  $\pi$  é formado por parâmetros concentrados: resistor, indutor e capacitor, como ilustrada a Figura 2.9. A rede de distribuição é formada com vários segmentos em série/paralelo do tipo  $\pi$ . Nota-se que foi representado um segmento de linha, portanto, foram adicionados pontos de conexão tanto do lado direito, como do esquerdo, nos quais esse será conectado a outros segmentos.

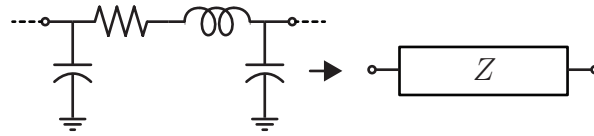


Figura 2.9: Segmento de um linha  $\pi$ .

Como em um SEP existem vários segmentos de linha, a obtenção da matriz impedância é fundamental. Essa pode ser determinada de forma simplificada aplicando o método apresentado em (GRADY, 2012). Considerando o circuito exemplo da Figura 2.10, o qual é constituída por cinco segmentos de linha, é possível analisar a influência da corrente de compensação nas tensões dos três PACs,  $(V_{(1)}, V_{(2)}, V_{(3)})$ . Aplicando a Lei de Kirchoff das correntes para determinar as tensões dos PACs, obtêm-se as equações (2.10) a (2.14).

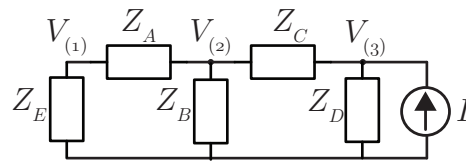


Figura 2.10: Circuito simplificado para análise da influência corrente do APLC nas tensões dos PAC.

$$\text{Para } k = 1, \quad \frac{V_{(1)}}{Z_E} + \frac{V_{(1)} - V_{(2)}}{Z_A} = 0, \quad (2.10)$$

$$\text{para } k = 2, \quad \frac{V_{(2)}}{Z_B} + \frac{V_{(2)} - V_{(1)}}{Z_A} + \frac{V_{(2)} - V_{(3)}}{Z_{(C)}} = 0, \quad (2.11)$$

$$\text{para } k = 3, \quad \frac{V_{(3)}}{Z_D} + \frac{V_{(3)} - V_{(2)}}{Z_C} = I. \quad (2.12)$$

Reescrevendo as Equações (2.10) a (2.12) na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{Z_E} + \frac{1}{Z_A} & -\frac{1}{Z_A} & 0 \\ -\frac{1}{Z_A} & \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} & -\frac{1}{Z_C} \\ 0 & -\frac{1}{Z_C} & \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix}, \quad (2.13)$$

e de forma simplificada,

$$Y_{(k,m)}V_{(k)} = I_{(m)}, \quad (2.14)$$

em que  $Y$  é a matriz admitância,  $V$  é a matriz de tensão e  $I$  a matriz de corrente do circuito.

A matriz  $Y$  pode ser obtida observando que os elementos:

- da diagonal principal contém a soma de todas admitâncias conectadas diretamente ao PAC correspondente;
- fora da diagonal principal tem a soma negativa de todos os segmentos conectados diretamente entre os PACs correspondentes.

Sendo assim, é possível calcular a matriz admitância de forma simples, declarando os dados,

A partir do PAC	Para o PAC	Impedância( $Z$ )	
1	0	$Z_E$	(2.15)
1	2	$Z_A$	
2	0	$Z_B$	
2	3	$Z_C$	
3	0	$Z_D$	

os quais são utilizando como entrada para o pseudo algoritmo descrito a seguir.

---

```

 $Y_y = 1/Z;$ 
if  $k \neq 0$  then
   $Y_{(k,k)} = Y_{(k,k)} + Y_y$  //Modifica elementos da diagonal principal
if  $m \neq 0$  then
   $Y_{(m,m)} = Y_{(m,m)} + Y_y$  //Modifica elementos da diagonal principal
if  $k \neq 0$  &&  $m \neq 0$  then
   $Y_{(k,m)} = Y_{(k,m)} - Y_y$  //Modifica elementos fora da diagonal
   $Y_{(m,k)} = Y_{(m,k)} - Y_y$ 

```

---

Como este trabalho avalia a influência de harmônicos e a impedância desses elementos varia de acordo com a frequência, considera-se  $x_{L(h)} = hx_L$  e  $x_{C(h)} = 1/hx_C$ . Para cada

harmônico uma matriz admitância é implementada, considerando  $h = 2, \dots, H$ , (GRADY, 2012).

Após a determinação simplificada da matriz admitância, pode-se calcular as tensões dos PACs por  $V_{(k)} = Z_{(k,m)}I_{(m)}$ , em que  $Z_{(k,m)} = Y_{(k,m)}^{-1}$  para todos os PACs e  $Z_{(k,m,h)} = Y_{(k,m,h)}^{-1}$ , quando os harmônicos são considerados.

## 2.7 Equacionamento

Definidos os modelos dos elementos do SEP é possível determinar as equações do modelo. Para que o modelo fosse linearizado, a corrente da carga não linear e do APLC foram consideradas como fontes de corrente com diferentes harmônicos e amplitudes.

Como a disponibilidade de dados do sistema é restrita, assume-se que as variáveis conhecidas são apenas: a tensão nos PACs, as correntes de compensação harmônica e as impedâncias do SEP. As demais variáveis podem ser consideradas como perturbações, que são compensadas pela ação do controle.

Conhecendo os dados de tensão antes da instalação dos APLCs, pode-se determinar a tensão compensada a partir da influência da corrente de compensação na impedância, Equações (2.16) e (2.17), como ilustrado de forma genérica na Figura 2.11.

$$|V_{c_{(k,h)}}| = |V_{(k,h)} + Z_{(k,m,h)}I_{(m,h)}|, \quad (2.16)$$

$$|V_{c_{(k,h)}}^{Re} + jV_{c_{(k,h)}}^{Im}| = |(V_{(k,h)}^{Re} + V_{(k,h)}^{Im}) + (Z_{(k,m,h)}^{Re} + Z_{(k,m,h)}^{Im})(I_{(m,h)}^{Re} + I_{(m,h)}^{Im})|, \quad (2.17)$$

em que:

$V_c$ : é a tensão com compensação de tensão, portanto  $V_{c_{(k,h)}}$  é a tensão compensada no PAC  $k$  na ordem do harmônico  $h$ ;

$m$ : é o número do PAC em que o APLC é instalado para  $m = 1, 2, \dots, M$ , e  $M$  é o número máximo de PACs que os APLCs podem ser instalados, ( $M \leq N$ ).

## 2.8 Regulamentação e normatização

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável por regulamentar os níveis de tensão e distorção harmônica do SEP. Em 2009, a ANEEL elaborou

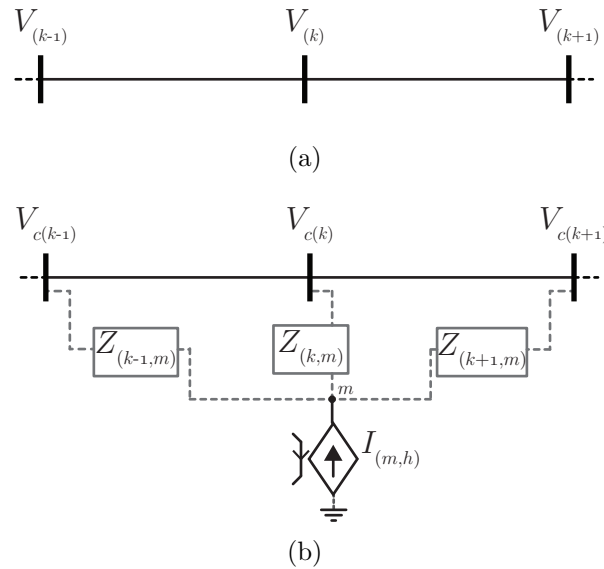


Figura 2.11: Representação simplificada do SEP: a) sem compensação e b) com compensação do APLC.

o documento (PRODIST, 2009) que referência de medição dos níveis de THD e de IHD de tensão para planejamento elétrico. A norma apresenta valores para harmônicos de até 25ª ordem, em que a THD varia em uma faixa de 3 % a 10 %, para níveis de operação de 138 kV a 1 kV, sendo que quanto maior o nível de tensão de operação, menores níveis de THD permitidos. A referência para IHD é dada para cada ordem de harmônico e para cada faixa de operação de tensão, variando entre 7,5 % a 0,5 % para harmônicos ímpares (não incluindo os harmônicos de sequência zero), de 6,5 % a 0,5 % para harmônicos de sequência zero, e de 2,5 % a 0,5 % para harmônicos pares. Salientado que quanto maior a ordem do harmônico, menor a referência para a distorção harmônica individual de tensão.

Internacionalmente, a norma (IEEE-STD.519, 1993) recomenda que os níveis de distorção harmônica total e tensão harmônica individual de tensão. O limite máximo a ser entregue aos consumidores no PAC não devem ultrapassar os 5% de THD e 3% de IHD. Essa norma é utilizada como referência base para o sistema de distribuição dos EUA. Na Europa, a norma regulatória para tensão em SEPs, é descrita em (EN-50160, 1999), que estipula os valores de distorção harmônica de tensão no PAC. O limite total é de THD é menor que 8%, sendo que a IHD varia em uma faixa de 0,3% a 6%, dependendo da ordem do harmônico. Por exemplo, para a 5ª ordem de harmônico a IHD é menor que 6%. Diferente da (PRODIST, 2009), a norma se estende para harmônicos até 40ª ordem. Visivelmente, a

norma, (IEEE-STD.519, 1993), possui os limites mais restritos, portanto, é a norma mais utilizada como referênica para trabalhos.

Os índices de qualidade de energia abordados neste trabalho são baseados na norma: (IEEE-STD.519, 1993). Para obter esses valores a partir da tensão decomposta são utilizadas as Equações (2.18), para distorção total, e (2.19), para distorção individual.

$$THD_{(k)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |V_{(k,h)}|^2}}{|V_{(k,1)}|}, \quad (2.18)$$

$$IHD_{(k)} = \frac{|V_{(k,h)}|}{|V_{(k,1)}|}, \quad (2.19)$$

em que  $V_{(k,h)}$  é a tensão do  $h$ -ésimo harmônico, no PAC  $k$  e  $V_{(k,1)}$  é a tensão fundamental ( $h = 1$ ) no PAC  $k$ . Sendo:  $h = 1, 2, \dots, H$  e  $k = 1, 2, \dots, N$ .

## 2.9 Efeito dos harmônicos

Na seção anterior foi visto que as normas regulamentam níveis máximos de distorção harmônica nos PACs, no entanto, como os harmônicos não foram eliminados, esses podem afetar o funcionamento do SEP e dos de equipamentos instalados nesse. Para um bom funcionamento do SEP e da operação de equipamentos, a tensão de alimentação deve apresentar alta qualidade de energia, ou seja, com uma forma de onda senoidal com nível de tensão e frequência próximos ao nominal. A distorção harmônica da tensão pode causar operação subótima, ou seja, eficiência reduzida e redução do tempo de vida útil, (MARKIEWICZ e KLAJN, 2004). Para exemplificar, neste capítulo são estudados os efeitos de harmônicos nas perdas nos segmentos de linha.

### 2.9.1 Segmentos de linha

Normalmente, as perdas nos segmentos de linhas são dadas pela queda de tensão nas resistências dos cabos, dada por  $I^2R$  ou  $V^2/R$ . Entretanto, quando há presença de harmônicos nessas linhas, a impedância dos indutores aumenta, e dessa forma, esses passam a apresentar maior influência nas perdas. Portanto, a relação entre harmônicos e perdas nas linhas é expressa na equação (2.20).

$$HTLL_k = \sum_{h=2}^H \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{k=m+1}^N \frac{R_{(k,m,h)}}{[z_{(k,m,h)}]^2} |V_{(m,h)} - V_{(k,h)}|^2 \right] \quad (2.20)$$

## 2.10 Conclusões

A partir do modelamento dos sistemas é possível determinar equações utilizadas na formulação e solução da localização, dimensionamento e controle dos APLCs. Analisando os efeitos dos harmônicos, serão determinados os índices mais importantes para a formulação da função objetivo. A partir do conhecimento das normas reguladoras e modelamento do APLC, as restrições e as estratégias de solução do problema de localização podem ser elaboradas. Além disso, com o modelamento é possível determinar relações entre as variáveis, que podem auxiliar na elaboração das malhas de controle dos APLCs. A partir do equacionamento e restrições apresentadas nos próximos capítulos serão estudados a localização, dimensionamento e controle de APLCs.

# 3

## Localização e dimensionamento dos APLCs

O problema de localização e dimensionamento ótimo de APLCs é de relativa complexidade, visto que demanda um estudo detalhado do SEP onde a compensação será efetuada. O estudo do SEP permite identificar PACs com THD de tensão elevada, bem como, determinar a impedância do sistema. A partir desses, é possível solucionar o problema, identificando os pontos ótimos e a quantidade de APLCs que devem ser instalados. A qualidade dessa solução está diretamente relacionada com a mínima corrente de compensação com capacidade de minimizar interferências, ressonâncias, perdas e distorções harmônicas de tensão.

A eficiência da compensação depende diretamente das barras em que os APLCs estão instalados. Usualmente, quando é avaliado somente a eliminação de harmônicos, os APLCs são alocados junto a carga. Entretanto, deve ser considerado que: a carga pode apresentar potência harmônica maior que o APLC, o SEP pode apresentar mais cargas que o número de APLCs disponíveis e as cargas são conectadas e desconectadas do SEP dinamicamente, além do efeito de propagação de harmônicos devido à ressonância. Em função das diferentes considerações, minimizações e restrições que o problema apresenta, a localização e dimensionamento de APLCs é formulado e solucionado baseado um problema de otimização.

A solução de um problema de otimização, de forma geral, maximiza ou minimiza uma  $OF$  de acordo com os valores de variáveis de decisão, (3.1). A solução de um problema de minimização resulta em um conjunto de valores, que tornam a  $OF$  mínima no espaço

de soluções, definido pelos valores possíveis para  $x_n$ . Quando esse espaço é finito, o problema possui restrições, que podem ser um vetor de restrição de igualdade ( $EC$ ), (3.2), ou de restrição de desigualdade ( $IC$ ), (3.3). Matematicamente, a otimização é formulada em (NOCEDAL e WRIGHT, 1999):

$$\min \text{ ou } \max \quad OF(x_n) \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$EC_j(x_n) = 0, \quad (3.2)$$

$$IC_l(x_n) \leq 0, \quad (3.3)$$

em que:

$x$  é um vetor de  $n$  variáveis de decisão que minimizam ou maximizam (3.1). Se  $x_n$ , variável independente ou de controle, for um escalar, a otimização é unidimensional. Do contrário, se  $x_n$  for um vetor, a otimização é multidimensional;

$l=[1,2,\dots,L_l]$  define o número de restrições de igualdade, variando de 1 até o valor máximo de restrições  $L_l$ ;

$j=[1,2,\dots,J_j]$  define o número de restrições de desigualdade, variando de 1 até o valor máximo de restrições  $J_j$ .

Os trabalhos (GRADY et al., 1991; GRADY et al., 1992) foram os primeiros a apresentar uma formulação de otimização para localização e dimensionamento, no qual representaram o problema com um único APLC e, solucionaram utilizando um método tradicional, pois considerando apenas um compensador, o problema é convexo. Em (CHANG et al., 1994; CHANG et al., 1995; CHANG e GRADY, 1997), o problema foi estendido e formulado para alocar múltiplos APLCs. Para obter os pontos ótimos de instalação, foi utilizado um método tradicional, entretanto, esse foi completado com outro algoritmo (explicado posteriormente), visto que o problema com múltiplos compensadores torna-se não convexo. Quando o problema é convexo existe um mínimo global, contudo, com múltiplos APLCs, o problema passa a ser mais complexo apresentando mínimos locais, o que favorece a utilização de métodos heurísticos. Nesse sentido, em (KEYPOUR et al., 2004; ZIARI e JALILIAN, 2010), o mesmo problema de múltiplos APLCs foi estudado e solucionado utilizando GA e PSO, respectivamente.



Para entender a formulação e solução da localização e dimensionamento de APLCs no SEP, neste capítulo, o problema será formulado e solucionado considerando um APLC e um cenário, e em seguida considerando múltiplos APLCs e um cenário. Por fim, a localização será introduzida considerando a variação dinâmica dos elementos do SEP, na qual são determinados os cenários, a formulação e a solução para múltiplos APLCs e múltiplos cenários.

### 3.1 Formulação do problema - Único APLC e Único cenário

O primeiro trabalho que tratou do problema de localização foi apresentado em (GRADY et al., 1991). O autor estudou um único cenário, um APLC sem e com restrição de corrente, múltiplos harmônicos (MH) e múltiplos barramentos (MB). A  $OF$  foi expressa pelo quadrático da Equação (2.16). Nota-se que em um problema de otimização soluciona-se uma equação para encontrar o ponto mínimo global, que em uma função quadrática convexa será igual a zero. A restrição de corrente foi imposta a corrente eficaz, (2.2), sendo a corrente máxima igual a,  $I^{\max}$ .

Em (GRADY et al., 1992) foi incluído à solução do problema, índices de qualidade de energia. O primeiro índice de qualidade de energia utilizado para solução de minimização foi a THD. O ponto ótimo foi determinado pela minimização da  $OF$ , que resulta em uma corrente necessária para reduzir ao mínimo o valor de THD, (2.18). Sem restrição de corrente, o ponto ótimo encontrado foi junto a carga, onde usualmente o APLC é instalado, reduzindo a THD a praticamente 0%. Entretanto, quando a corrente do APLC foi restrita a 50% da potência da carga, o ponto ótimo foi no final do ramo do SEP. Esse trabalho mostrou que nem sempre o ponto ótimo de instalação do APLC é junto a carga.

Ainda no trabalho de (GRADY et al., 1992), foi estudada a solução baseado nos índices de perdas de torque em motores (*Motor Load Losses*) (MLL), fator de influência de telefone (*Telephone Influence Factor*) (TIF), e compensação para obter forma de onda senoidal (compensação mais usual).

O estudo de MLL mostrou ser promissora, pois a curva característica do torque do motor sofre influência de harmônicos provenientes da tensão de alimentação. A influência

é causada, porque a característica do torque de aceleração de alguns harmônicos coincidem com a frenagem de outros, (MARKIEWICZ e KLAJN, 2004). O 5º e o 7º são os harmônicos que mais influenciam na perda de torque, e coincidentemente, são as ordens de harmônicos com valores mais elevados nas linhas de distribuição, (MARKIEWICZ e KLAJN, 2004).

A influência do TIF é dada em função dos harmônicos de tensão e de corrente, os quais causam interferência nos circuitos de comunicação de telefones. Quando o estudo objetivou a forma de onda puramente senoidal, concluiu que a localização baseando-se na compensação da senoide não é uma boa estratégia para determinar o ponto ótimo em SEPs, visto que, o nível de THD fica próximo de zero no ponto de instalação do APLC, no entanto, podendo elevar este nível nos demais PACs.

A norma (IEEE-STD.519, 1993) foi a base para a formulação das restrições de (CHANG et al., 1994). Diferente dos trabalhos já apresentados, que reduziram ao mínimo a  $OF$  de acordo com a restrição de corrente, em (CHANG et al., 1994) o autor reduziu a  $OF$  até satisfazer os níveis de THD e IHD, (2.19). Desta forma, o objetivo passou a ser minimização da corrente em função das restrições de distorção harmônica.

### 3.1.1 Função Objetivo

A partir dos estudos apresentados, a  $OF$  para um APLC e um cenário depende da corrente  $I$  do APLC no PAC  $m$  para os harmônicos  $h = [2, 3, \dots, H]$ , como ilustra a Figura 2.11 e expressa a equação:

$$OF(I_{(m,h)}) = \sum_{k=1}^N \sum_{h=2}^H |V_{c(k,h)}|^2 = \sum_{k=1}^N \sum_{h=2}^H |V_{(k,h)} + Z_{(k,m,h)} I_{(m,h)}|^2. \quad (3.4)$$

Expandindo a função quadrática da Equação (3.4), obtém-se a Equação (3.5):

$$OF(I_{(m,h)}) = A_{C_{(k,m,h)}} + B_{C_{(k,m,h)}} I_{(m,h)}^{Re} + C_{C_{(k,m,h)}} I_{(m,h)}^{Im} + D_{C_{(k,m,h)}} ([I_{(m,h)}^{Re}]^2 + [I_{(m,h)}^{Im}]^2), \quad (3.5)$$

em que:

$$A_{C(k,m,h)} = \sum_{k=1}^N [V_{(k,h)}^{Re}]^2 + [V_{(k,h)}^{Im}]^2, \quad (3.6)$$

$$B_{C(k,m,h)} = 2 \sum_{k=1}^N [V_{(k,h)}^{Re} Z_{(k,m,h)}^{Re} + V_{(k,h)}^{Im} Z_{(k,m,h)}^{Im}], \quad (3.7)$$

$$C_{C(k,m,h)} = 2 \sum_{k=1}^N [V_{(k,h)}^{Im} Z_{(k,m,h)}^{Re} - V_{(k,h)}^{Re} Z_{(k,m,h)}^{Im}], \quad (3.8)$$

$$D_{C(k,m,h)} = \sum_{k=1}^N [Z_{(k,m,h)}^{Re}]^2 + [Z_{(k,m,h)}^{Im}]^2. \quad (3.9)$$

### 3.1.2 Restrições

As restrições são definidas em relação a corrente máxima que o APLC pode fornecer e aos índices de distorção harmônica de tensão, THD e IHD. Considerando, que essas restrições determinam limites máximo de operação, é possível determinar três equações de  $IC$ .

A  $IC$  da corrente eficaz máxima é dada por:

$$IC(I_{(m,H)}) \leq I^{\max}, \quad (3.10)$$

e as restrições em relação a distorção harmônica são expressas por:

$$IC(THD_{(k,H)}) \leq THD^{\max}, \quad (3.11)$$

$$IC(IHD_{(k,h)}) \leq IHD_{(h)}^{\max}. \quad (3.12)$$

### 3.1.3 Solução com Algoritmo Tradicional

A solução para o problema de um APLC e um cenário é não linear, e pode ser obtida satisfazendo as condição do KKT, (3.15) a (3.17), (NOCEDAL e WRIGHT, 1999; GRADY et al., 1991). O conjunto de condições do KKT estabelece as condições necessárias para encontrar o ponto ótimo. Por este teorema, é definido a função Lagrangeana ( $La$ ), que associa a  $OF$  às equações de restrições através de multiplicadores de Lagrange. Os multiplicadores,  $\lambda$  e  $\mu$ , são relacionados a restrição de igualdade ( $EC$ ) e a restrição de desigualdade ( $IC$ ), respectivamente, resultando na Equação (3.13).

$$La(x_n, \lambda_{(j)}, \mu_{(l)}) = \nabla OF(x_n) + \sum_{j=1}^{J_j} \lambda_{(j)} \nabla EC_{(j)}(x_n) + \sum_{l=1}^{L_l} \mu_{(l)} \nabla IC_{(l)}(x_n) \quad (3.13)$$

O ponto mínimo é encontrado quando as três condições de KKT a seguir são verdadeiras:

$$\text{Primeira condição: } IC_{(l)}(x_n) \leq 0 \quad (3.14)$$

$$EC_{(j)}(x_n) = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{Segunda condição: } \mu_{(l)} \geq 0 \quad (3.16)$$

$$\text{Condição de ajuste: } \mu_{(l)} IC_{(l)}(x_n) = 0 \quad (3.17)$$

Se  $OF(x_n)$  possui um ponto de ótimo para o problema original, então existe um  $\lambda$  tal que  $(x_n, \lambda)$  é um ponto estacionário para a  $La$ , ou seja, existe em ponto para o qual as derivadas parciais de multiplicador de Lagrange para EC ( $\lambda$ ) são iguais a zero.

A formulação sem restrição de  $La$  é definida por  $Lu$ , expressa pela Equação (3.18).

$$Lu(I_{(m,h)}^{\text{Re}}, I_{(m,h)}^{\text{Im}}) = \nabla OF(I_{(m,h)}) \quad (3.18)$$

Aplicando a segunda condição de KKT, chega-se em uma Matriz Hessiana positiva-definida. Portanto, a  $OF$  é convexa e a solução pode ser expressa por:

$$I_{(m,h)}^{\text{Re}} = -\frac{B_{C(k,m,h)}}{2D_{C(m,h)}}, \quad (3.19)$$

$$I_{(m,h)}^{\text{Im}} = -\frac{C_{C(k,m,h)}}{2D_{C(m,h)}}. \quad (3.20)$$

Quando for considerada a restrição de corrente,  $La$  é definida como  $Lc$ , Equação (3.21).

$$Lc(I_{(m,h)}^{\text{Re}}, I_{(m,h)}^{\text{Im}}, \mu) = \nabla OF(I_{(m,h)}) + \mu \nabla IC(I_{(m,h)}) \quad (3.21)$$

Nota-se que há somente um multiplicador de Lagrange,  $\mu$ , porque a corrente eficaz limitada contém todos os harmônicos, assim não é necessário o somatório, como definido no último termo da Equação (3.13).

A restrição de corrente é imposta com base na máxima potência física que o compensador suporta, ou a máxima potência disponível para filtros que serão localizados. A restrição de corrente foi definida pela Equação (3.10).

A solução com restrição de corrente é baseada no resultado obtido na solução sem restrição. Nesse sentido, o valor encontrado na solução sem restrições de corrente é minimizado pelo método de bisseção e limitado ao valor máximo de corrente,  $I^{\max}$ , estabelecido. O método e simplificações para encontrar a corrente mínima foram apresentados por (GRADY et al., 1991).

A Equação (3.21) apresenta restrições, portanto, as condições do KKT foram utilizadas para encontrar o mínimo global. Pela primeira condição do KKT, primeira derivada parcial da corrente, obtêm-se:

$$\frac{\partial Lc[I_{(m,h)}^{\text{Re}}, I_{(m,h)}^{\text{Im}}, \mu]}{\partial I_{(m,h)}^{\text{Re}}} = B_{C(m,h)} + 2D_{C(m,h)}I_{(m,h)}^{\text{Re}} + 2\mu I_{(m,h)}^{\text{Re}} = 0, \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial Lc[I_{(m,h)}^{\text{Re}}, I_{(m,h)}^{\text{Im}}, \mu]}{\partial I_{(m,h)}^{\text{Im}}} = C_{C(m,h)} + 2D_{C(m,h)}I_{(m,h)}^{\text{Im}} + 2\mu I_{(m,h)}^{\text{Im}} = 0. \quad (3.23)$$

Aplicando a segunda condição de KKT, (3.16), para a restrição de corrente, (3.10), tem-se a Equação (3.24).

$$\mu \left[ \sum_{h=2}^H [I_{(m,h)}^{\text{Re}}]^2 + [I_{(m,h)}^{\text{Im}}]^2 - [I_{(m)}^{\max}]^2 \right] = 0 \quad (3.24)$$

A derivada parcial de segunda ordem com restrição é igual a solução sem restrição, portanto, também apresenta a matriz Hessiana positivo-definida. Deste modo, o ponto ótimo pode ser encontrado por:

$$I_{(m,h)}^{\text{Re}}(D_{C(m,h)} + \mu) = -\frac{B_{C(m,h)}}{2}, \quad (3.25)$$

$$I_{(m,h)}^{\text{Im}}(D_{C(m,h)} + \mu) = -\frac{C_{C(m,h)}}{2}. \quad (3.26)$$

A corrente limitada pode ser expressa multiplicando um escalar pelas Equações de corrente ilimitada (3.19) e (3.20), expressa por:

$$I_{(m,h)}^{\text{Re}} = -\alpha_{(m,h)}^{\text{Re}} \frac{B_{C(m,h)}}{2D_{C(m,h)}}, \quad (3.27)$$

$$I_{(m,h)}^{\text{Im}} = -\alpha_{(m,h)}^{\text{Im}} \frac{C_{C(m,h)}}{2D_{C(m,h)}}. \quad (3.28)$$

Substituindo a Equação (3.25) na Equação (3.27) e a Equação (3.26) na Equação (3.28), chega-se em:

$$\alpha_{(m,h)}^{\text{Re}}(D_{C(m,h)} + \mu) = \alpha_{(m,h)}^{\text{Im}}(D_{C(m,h)} + \mu) = D_{C(m,h)}. \quad (3.29)$$

A equação acima implica que o mesmo fator de escala  $\alpha_m^h$  pode ser usado para ambas as correntes, reais e imaginárias, em qualquer  $h$  harmônico, assim, tem-se:

$$\alpha_{(m,h)}(D_{C(m,h)} + \mu) = D_{C(m,h)}. \quad (3.30)$$

Isolando  $\mu$  da Equação (3.30), obtém-se:

$$\mu = D_{C(m,h)} \left( \frac{1}{\alpha_{(m,h)}} - 1 \right). \quad (3.31)$$

Como  $D_{C(m,h)}$  é positivo, então  $\mu$  será positivo e irá satisfazer a segunda condição de KKT expressa pela Equação (3.16), provando que  $\alpha_{(m,h)}$  é um escalar entre 0 e 1.

O multiplicador de Lagrange  $\mu$  é o mesmo para todos os harmônicos. Por isso,  $\alpha$  para qualquer harmônica em  $t$  está relacionada à  $\alpha$  para  $h$  harmônicos através da Equação (3.31).

$$\alpha_{(m)}^t = \left( \frac{1}{1 + \frac{D_{C(m,h)}(1 - \alpha_{(m,h)})}{D_{C(m)}^t \alpha_{(m,h)}}} \right) \quad (3.32)$$

Desde que  $\mu$  seja diferente de zero, o estado de relaxamento complementar da Equação (3.24) deve ser a restrição de corrente, como segue:

$$\sum_{h=2}^H \left( [I_{(m,h)}^{\text{Re}}]^2 + [I_{(m,h)}^{\text{Im}}]^2 \right) = [I_{(m)}^{\text{max}}]^2. \quad (3.33)$$

Substituindo as Equações (3.27), (3.28), (3.19) e (3.20) na expressão acima, enquanto é usado o mesmo fator de escala para ambas as correntes reais e imaginários para todo o  $h$  harmônico, tem-se:

$$\sum_{h=2}^H [\alpha_{(m,h)}]^2 \left( [I_{(m,h)}^{\text{Re}}]^2 + [I_{(m,h)}^{\text{Im}}]^2 \right) = [I_{(m)}^{\text{max}}]^2. \quad (3.34)$$

Substituindo as equações (3.19) e (3.20) na expressão acima determina-se a Equação (3.35), apresentada no estado da arte.

$$\sum_{h=2}^H [\alpha_{(m,h)}]^2 \left( \frac{[B_{(m,h)}]^2 + [C_{(m,h)}]^2}{2 [D_{(m,h)}]^2} \right) = [I_{(m)}^{\text{max}}]^2 \quad (3.35)$$

Resolvendo o problema de otimização com restrição, é necessário determinar o conjunto que satisfaz a Equação (3.35). Isso é feito utilizando um método iterativo e como exemplo utiliza-se o método da bisseção da seguinte forma:

1. Escolher um valor inicial entre 0 e 1 para  $\alpha$  do menor múltiplo harmônico de interesse (acima da fundamental).
2. Usar a Equação (3.32) para calcular os  $\alpha$  para os harmônicos restantes.
3. Substituir o conjunto de  $\alpha$  encontrados nas etapas 1 e 2 na Equação (3.35), e verificar a igualdade.
4. Se a Equação (3.35) está fora da tolerância desejada ( $0,000001 \text{ pu}^2$ ), aumentar ou diminuir  $\alpha$  na Etapa 1), utilizando o método da bisseção. Refazer os passos 2 - 4 até (3.35) ser satisfeita dentro da tolerância. Então, usar as Equações (3.27) e (3.28) para calcular a injeção de correntes dos filtros.

O método apresentado resulta em um valor de corrente minimizado. Entretanto, é necessário verificar se a corrente encontrada reduz os limites de THD abaixo de 5% e IHD abaixo de 3%, satisfazendo a norma (IEEE-STD.519, 1993). Caso a corrente satisfaça a norma, o ponto ótimo é encontrado. No caso da THD resultante estar acima do limite de 5%, o estudo da localização deve ser estendido para mais compensadores na rede de distribuição.

### 3.1.4 Circuito exemplo

A partir da solução apresentada, é possível determinar a corrente necessária para cada PAC, sendo o ponto ótimo de instalação aquele que apresenta a maior redução da distorção harmônica de tensão com a menor corrente. Considerando o circuito base com uma carga não linear no PAC  $k=2$ , Figura 3.1, é possível explicar o problema proposto.

O primeiro cálculo das correntes considera o APLC instalado em  $m=2$ , Figura 3.2.

Observa-se que a equação considera a influência da corrente em todos os PACs, pelo

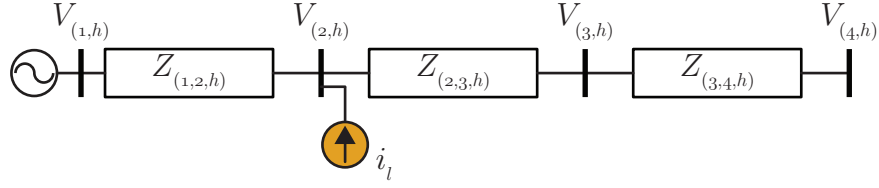


Figura 3.1: Circuito considerando uma carga não linear no PAC  $k=2$ .

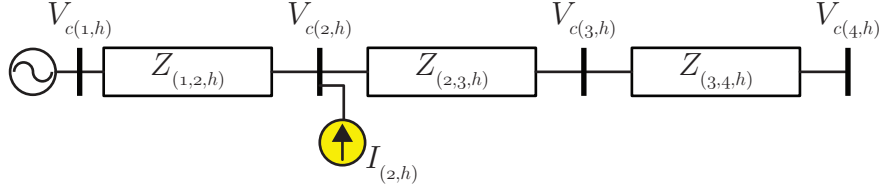


Figura 3.2: Circuito considerando um APLC no PAC  $m=2$ .

somatório dos  $k$ . A equação de corrente para o harmônico,  $h$ , estudado é dada por:

$$I_{(2,h)} = \sum_{k=1}^N \frac{\left[ V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,2,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,2,h)}^{\text{Im}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,2,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,2,h)}^{\text{Im}} \right]}{\left[ Z_{(k,2,h)}^{\text{Re}} \right]^2 + \left[ Z_{(k,2,h)}^{\text{Im}} \right]^2}. \quad (3.36)$$

Cálculo das correntes para  $m=3$ , a equação de corrente do harmônico  $h$  estudado é:

$$I_{(3,h)} = \sum_{k=1}^N \frac{\left[ V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,3,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,3,h)}^{\text{Im}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,3,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,3,h)}^{\text{Im}} \right]}{\left[ Z_{(k,3,h)}^{\text{Re}} \right]^2 + \left[ Z_{(k,3,h)}^{\text{Im}} \right]^2}. \quad (3.37)$$

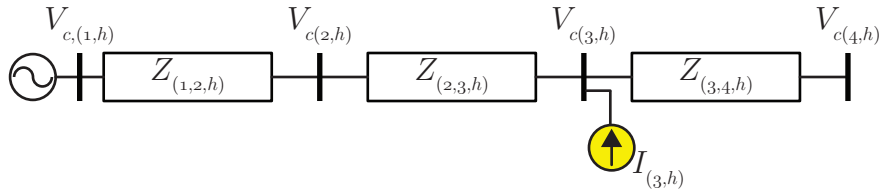


Figura 3.3: Circuito considerando um APLC no PAC  $m=3$ .

Cálculo das correntes para  $m=4$ , a equação de corrente para o harmônico  $h$  estudado é:

$$I_{(4,h)} = \sum_{k=1}^N \frac{\left[ V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,4,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,4,h)}^{\text{Im}} + V_{(k,h)}^{\text{Im}} Z_{(k,4,h)}^{\text{Re}} + V_{(k,h)}^{\text{Re}} Z_{(k,4,h)}^{\text{Im}} \right]}{\left[ Z_{(k,4,h)}^{\text{Re}} \right]^2 + \left[ Z_{(k,4,h)}^{\text{Im}} \right]^2}. \quad (3.38)$$

Após o cálculo das correntes para todos os PACs, verificam-se quais correntes apresentaram valores abaixo do valor limite de corrente. Seleciona-se o ponto que apresentou menor valor de corrente e verifica-se pelas inequações (3.11) e (3.12), se a norma foi satisfeita para todos os valores de  $k$ .



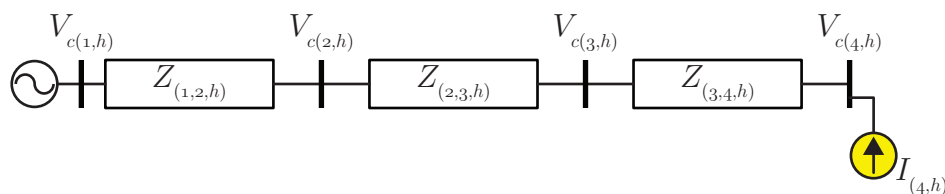


Figura 3.4: Circuito considerando um APLC no PAC  $m=4$ .

Considerando um circuito simples, somente com três PACs, um harmônico e uma carga, há necessidade de apenas um APLC e a solução poderia ser determinada como o apresentado. Contudo, em redes reais, são vários PACs e são necessários vários APLCs para que em todos os PACs as restrições de distorção harmônica de tensão sejam satisfeitas, o que implica em um somatório de correntes de APLCs, desse modo o problema deve ser expandido para múltiplos APLCs e um cenário.

## 3.2 Formulação do problema - Múltiplos APLCs e Único cenário

Os primeiros trabalhos considerando múltiplos APLCs foram apresentados em (CHANG et al., 1995; CHANG e GRADY, 1997). O estudo de localização de mais de um compensador acarreta em aumento da complexidade, pois deve ser considerada a influência de todas as correntes de compensação dos APLCs. Esse aumento de complexidade resulta em um problema com mínimos locais, ou seja, a função objetivo, que era convexa, torna-se não convexa. Dessa forma, a solução foi implementada baseada na função Lagrangeana e condições de KKT, já apresentada em (GRADY et al., 1991), acrescentando um algoritmo sequencial para a alocação dos APLCs. O algoritmo sequencial, primeiro, encontra o ponto de maior sensibilidade, que representa o ponto com a maior redução da distorção harmônica por ampere de corrente do APLC, depois calcula a corrente e verifica se as restrições foram satisfeitas. Caso sim, algoritmo é finalizado, caso não, recalcula-se a tensão com as correntes encontradas, aplica-se a Equação (2.16) e procedimento é repetido.

Em (KEYPOUR et al., 2004), o mesmo problema de múltiplos APLCs foi solucionado baseada em GA. O autor modificou os operadores do algoritmo para obter uma resposta mais rápida. A formulação utilizada foi dividida em dois algoritmos: um com base no trabalho apresentado em (GRADY et al., 1991), com o objetivo de minimizar a  $OF$  com o

limite máximo de corrente; outro baseado em (CHANG et al., 1994), com minimização de corrente para satisfazer a restrições de THD. Em ambos, a variável de decisão é a corrente dos APLCs, a qual é representada por um cromossomo de tamanho  $2HM$ . No primeiro algoritmo, são determinados os pontos de instalação dos APLCs, logo, o algoritmo inicializa alocando APLCs em todos os PACs. A cada passo do algoritmo, as correntes harmônicas dos pontos que apresentam menor viabilidade são zeradas, e assim sucessivamente, até que um número mínimo de pontos de instalação seja determinado. O algoritmo em questão determina o número de pontos de instalação mínimo pela análise do dimensionamento dos APLCs, número de APLCs e redução dos harmônicos de tensão. Com as localizações encontradas, é aplicado o algoritmo de minimização da corrente.

Em sequência ao GA, foi implementada outra alternativa para a solução de localização de múltiplos APLCs baseada na técnica de PSO, a qual, segundo o autor, demanda menor tempo para encontrar a solução de dimensionamento ótimo, devido ao fato de não apresentar tanta influência do mínimo local, (ZIARI e JALILIAN, 2010). O autor propôs uma  $OF$  com pesos, assim avaliando ao mesmo tempo mais de um índice. Os índices analisados foram THD, MLL, minimização da corrente de compensação ( $IF$ ), além das perdas harmônicas nas linhas (*Harmonic Transmission Line Losses*) (HTLL), (2.20). Todavia, para solucionar o problema com PSO, diferente dos demais que necessitam somente das tensões  $V$  e das impedâncias  $Z$ , é necessário o conhecimento das correntes das cargas. Também é necessário a alocação prévia dos APLCs, pois o autor não estudou algoritmo em questão para a localização, somente para o dimensionamento.

### 3.2.1 Função Objetivo

Quando um APLC é instalado no  $m$ -ésimo PAC, a tensão será compensada, passando de  $v_{(k)}$  para  $v_{c(k)}$  de acordo com a Equação (2.16). Quando o SEP, utilizado para solucionar o problema, é formulado com  $N$ -barras, contendo várias cargas não lineares, múltiplos APLCs são instalados em  $m = 2, 3, \dots, M, M < N$ . Nesse sentido, a equação da tensão de compensação é dada pela soma das correntes de compensação:

$$|V_{c(k,h)}| = |V_{(k,h)} + \sum_{m=1}^M Z_{(k,m,h)} I_{(m,h)}|. \quad (3.39)$$

De acordo com o estudo (KEYPOUR et al., 2004), além de reduzir as distorção harmônicas

de tensão, é importante considerar as perdas nas linhas devidas à presença dos harmônicos. Sendo assim, para o presente estudo a solução é considerada viável quando as restrições da inequações, (3.10), (3.11) e (3.12), são satisfeitas. Dentre as possíveis soluções, a melhor é aquela que apresentar menor corrente e menores perdas. Portanto, a  $OF$  do problema de otimização é modificada e reescrita com os quatro índices (THD, IHD, HTLL e  $IF$ ).

Os índices THD e IHD são minimizados para satisfazer IEEE-519. A THD é calculada pela Equação (2.18), sendo o global (para todos os PACs) THD dado pela soma das distorções de todos os PACs, isto é,

$$f_{THD} = \sum_{k=1}^N THD_{(k,H)}, \quad (3.40)$$

enquanto a IHD é determinado pela Equação (2.19), e o global IHD por:

$$f_{IHD} = \sum_{k=1}^N \sum_{h=2}^H IHD_{(k,h)}. \quad (3.41)$$

As perdas, HTLL, são calculadas pela Equação (2.20), e as perdas globais por:

$$f_{HTLL} = \sum_{k=1}^N HTLL_{(k,M,H)}. \quad (3.42)$$

A  $IF$  global é dada pelo somatório de  $I_{(m,H)}$  definido na Equação (2.2).

$$f_{IF} = \sum_{k=1}^N I_{(m,H)} \quad (3.43)$$

Considerando todos os índices acima, o problema de localização e dimensionamento é definido pela função objetivo,

$$OF = \rho_1 f_{THD} + \rho_2 f_{IHD} + \rho_3 f_{HTLL} + \rho_4 f_{IF}, \quad (3.44)$$

onde  $\rho_1 \geq 0$ ,  $\rho_2 \geq 0$ ,  $\rho_3 \geq 0$  and  $\rho_4 \geq 0$  são pesos,  $\sum_{i=1}^4 \rho_i \leq 100$ .

### 3.2.2 Função viabilidade

O problema de múltiplos APLCs pode ser solucionado com algoritmos heurísticos, portanto para lidar melhor com as restrições, a função de viabilidade ( $FvG$ ) é utilizada. Como o objetivo é encontrar o mínimo global da função, a maior viabilidade de uma solução é dada pelo menor resultado da  $OF$ .

$$FvG = \min(OF) \quad (3.45)$$

Uma maneira de considerar restrições é desconsiderar os vetores que são inviáveis, mas se o espaço de procura é finito, esse método é ineficaz. Assim é realizada a seguinte modificação, (KEYPOUR et al., 2004):

$$FvG = (G_1 Nv + OF), \quad (3.46)$$

em que  $G_1$  é uma constante muito alta e que  $Nv$  é a inviabilidade para calcular a variável de decisão. Por exemplo, se  $IC_l(x_n) \leq b_l$  é a restrição número de restrições de desigualdade ( $l$ ) do problema, define-se:

$$d_l = \begin{cases} 0 & \text{se } IC_l(x_n) \leq b_l, \\ \frac{IC_l(x_n) - b_l}{b_l} & \text{se } IC_l(x_n) > b_l, \end{cases} \quad (3.47)$$

em que,  $d$  é o nível de inviabilidade da restrição  $l$ . Assim, a inviabilidade pode ser calculada como:

$$Nv = \sum_l^{L_l} d_l, \quad (3.48)$$

em que o  $L_l$  é o número de restrições de desigualdade. Devido ao valor alto de  $G_1$ , antes a solução obtida, o algoritmo inicializa a procura por soluções de níveis menos viáveis. Esse nível torna-se zero quando todas as restrições forem satisfeitas.

### 3.2.3 Solução com Algoritmo Sequencial

Com o aumento da complexidade do problema de múltiplos APLCs, a  $OF$  não apresenta mais características de uma função convexa, com um mínimo global. A resposta ao problema de localização e dimensionamento passa a apresentar um conjunto de soluções ótimas que satisfazem as restrições, portanto, o problema apresenta vários mínimos locais, conforme ilustra a Figura 3.5.

Dessa forma, algoritmos puramente tradicionais não conseguem solucionar o problema de forma correta. Como já mencionado, em (CHANG e GRADY, 1997), uma solução de múltiplos APLCs foi apresentada, em que um algoritmo tradicional (baseada na função Lagrangeana e condições de KKT) foi combinado com um algoritmo sequencial .

O algoritmo sequencial é baseado na solução de um APLC e um cenário, na avaliação do ponto de maior sensibilidade e aumenta a quantidade de compensadores sequencialmente, conforme os passos a seguir:

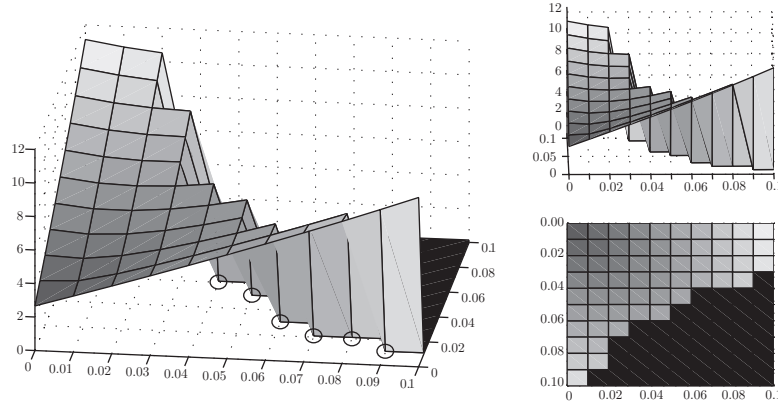


Figura 3.5: Gráfico exemplo da soluções do problema com mais de um APLC. A solução apresenta vários mínimos locais, destacados com os círculos.

1. Entrar com os dados das impedâncias de linhas entre os pontos de possível instalação dos APLCs e das tensões dos PACs.
2. Calcular os índices de prioridade para localização de um APLC, a partir dos ângulos da impedância  $\theta$ , da tensão  $\delta$  e da corrente  $\gamma$ :

$$SI = \frac{\partial F(I_m)}{\partial |I_{(m,h)}|} = 2 \sum_{k=1}^N |V_{(k,h)}| |Z_{(k,m,h)}| \cos(\theta_{(k,m,h)} + \delta_{(k,h)} + \gamma_{(m,h)}). \quad (3.49)$$

O melhor  $\gamma_{(m,h)}$  é dado pelo resultado da *arctan* da Equação (3.50), que produz valor mais negativo para a Equação (3.49), visto que a função *tan* possui dois resultados.

$$\tan(\gamma_{(m,h)}) = -\frac{\sum_{k=1}^N \sin(\theta_{(k,m,h)} + \delta_{(k,h)})}{\sum_{k=1}^N \cos(\theta_{(k,m,h)} - \delta_{(k,h)})}. \quad (3.50)$$

3. Determinar os possíveis pontos para a instalação de APLCs pelo método de um único APLC.
4. Verificar a existência de um possível ponto de instalação para o APLC. Se sim, pular para o item 7, caso contrário seguir para o próximo passo.
5. Localizar o filtro na posição com máxima prioridade encontrada no item 2 e solucionar o problema por corrente limitada, de acordo com as Equações (3.27) e (3.28) descritas na solução com um APLC e um cenário.
6. A partir das correntes encontradas, calcular a tensão aplicando a Equação (2.16). Retornar para o passo 2.

7. Verificar se um APLC, com a menor injeção de corrente obtida no item 3 é suficiente para restringir os níveis de THD, de acordo com a norma. Se não, voltar para o passo 5 caso contrário seguir para o próximo passo.
8. Posicionar o APLC(s) na(s) posição(ões) encontradas.

### 3.2.4 Solução com GA

O GA é baseado na estrutura natural genética. A teoria é baseada na melhor chance de sobrevivência para a população mais viável. Existem diferentes aplicações para o GA, tais como em biologia, computação, processamento de imagem e ciências sociais. A aplicação de GA em localização de APLCs no SEP foi implementada em (KEYPOUR et al., 2004; RAMOS et al., 2006). O objetivo desses estudos foi: 1) minimizar o nível de distorção harmônica, restringindo o limite máximo de corrente (ambos os trabalhos); 2) minimizar a corrente de compensação, restringindo o limite máximo de distorção regulamentado pela (IEEE-STD.519, 1993) em (KEYPOUR et al., 2004).

O GA pode ser usado como estimação de mínimo global ou máximo valores da função mesmo com presença de alguns locais extremos, isto é, ele vai encontrar mínimos locais e procurar o global entre eles. O procedimento é inicializado gerando uma população, *pop*, de cromossomos, *XG*, que representam as variáveis de decisão, Figura 3.6. A partir de dois operadores, chamados de *crossover* e mutação, novos cromossomos são gerados. E desses novos cromossomos, utilizando operador seleção, gera-se uma nova população baseada na seleção de cromossomos com melhor viabilidade (melhorando a função objetivo). O processo é repetido até não haver mais melhorias a serem alcançadas ou o número máximo de iteração ter sido alcançada.

O GA aplicado em alocação e dimensionamento de filtros segue os seguintes passos:

1. Inicializar o GA:
  - definir o número máximo de iterações, *iterM*;
  - definir o número tamanho da *pop*;
  - definir e criar o *XG* (vetor de variável de decisão), que é o vetor de corrente reais e imaginárias de tamanho  $2H + 1$ , definido matematicamente pelo vetor:

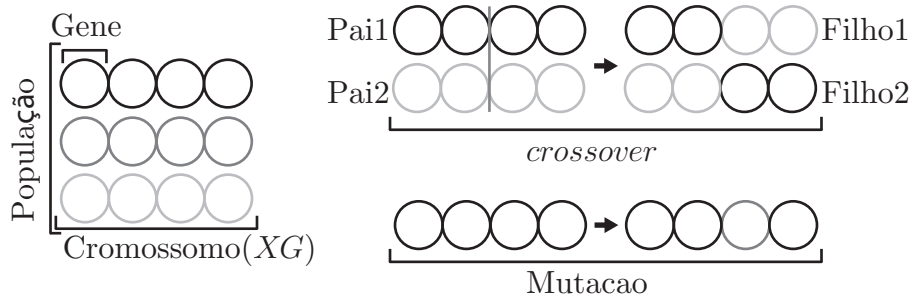


Figura 3.6: Ilustração dos passos do GA. Uma população é criada a partir de cromossomos, essa população é modificada sucessivamente pelos operadores *crossover* e *mutação* para o ponto ótimo.

$$XG_p = [m, I_{(m,1)}^{Re}, I_{(m,2)}^{Re}, \dots, I_{(m,H)}^{Re}, I_{(m,1)}^{Im}, I_{(m,2)}^{Im}, \dots, I_{(m,H)}^{Im}];$$

- implementar os operadores *crossover* e *mutação*.

2. Atualizar a tensão  $V_c$ .
3. Calcular a função objetivo  $OF$ , lembrando que a corrente é considerada o cromossomo,  $XG$ .
4. Aplicar o operador *crossover*, que mescla dois cromossomos, e gera dois novos cromossomos, aumentando a população para  $2pop$ .
5. Aplicar o operador *mutação*, que modifica uma das variáveis de decisão dos cromossomos gerando  $4pop$ .
6. Selecionar por torneio os melhores cromossomos de acordo com a função de viabilidade,  $FvG$ , que depende de  $OF$ . A partir da seleção, a população volta ao tamanho  $pop$ .
7. Se  $iter = iter_{max}$ , o algoritmo é finalizado, se não, voltar para o passo 3.

### 3.2.5 Solução com Algoritmo de PSO

O PSO é um algoritmo heurístico, que comparado ao GA, tem consumo de tempo reduzido, não sofre com o mínimo local, precisa de ajuste somente para alguns parâmetros e possui memória, (ZIARI e JALILIAN, 2010). A solução do PSO é baseado na técnica de adaptatividade, em que uma população de indivíduos, em paralelo, encontra a solução ótima em áreas viáveis em um espaço multidimensional. Os indivíduos são chamados de partículas e a população é chamada de *swarm*. Cada partícula de *swarm* se move para o ponto ótimo

com velocidade adaptativa. A velocidade aumenta quando as partículas se encontram em um espaço viável. A utilização desse método como solução de localização ótima foi apresentada em (ZIARI e JALILIAN, 2010). A solução dimensiona múltiplos filtros em uma rede de distribuição para que a norma (IEEE-STD.519, 1993) seja satisfeita.

O PSO converge a partir da modificação das partículas,  $XP$ , de acordo com a velocidade:

$$VP_p^{iter+1} = wv_p^{iter} + c_1r_1(CBF_p^{iter} - XP_p^{iter}) + c_2r_2(GBF_p^{iter} - XP_p^{iter}), \quad (3.51)$$

em que:  $VP$  é o vetor da velocidade da partícula na posição  $p$  na iteração  $iter$ ;  $XP$  é o vetor da partícula na posição  $p$  na iteração  $iter$ ;  $c_1$  e  $c_2$  são os coeficientes de aceleração com valores entre  $[0, 1]$ ;  $r_1$  e  $r_2$  são números randômicos;  $w$  é um constante do fator de inércia, mas também pode ser calculado conforme apresentado em (ZIARI e JALILIAN, 2010);  $CBF$  é a partícula de melhor viabilidade do *swarm*;  $GBF$  é a partícula de melhor viabilidade global.

A velocidade  $VP$  varia de acordo com os resultados obtidos da  $OF$ , conforme Equação (3.51). Como a velocidade depende da  $OF$ , essa variável guia a partícula até o ponto ótimo, como ilustra a Figura 3.7. O *Swarm* é formado por várias partículas, sendo que para cada partícula um trajeto é percorrido, dessa forma todas partículas convergem de um ponto inicial para o ponto ótimo.

O algoritmo para solução baseado em PSO é descrito pelos passos a seguir:

1. Inicializar o PSO:

- definir o número máximo de iterações,  $iterM$ ;
- definir o número máximo do *swarm*;
- definir a  $dim$ ,  $2H + 1$ ;
- criar o vetor de partículas (vetor de variável de decisão)  $XP_p^{dim}$ : (é o vetor das correntes reais e imaginárias do APLC para cada harmônico com tamanho  $2H + 1$ . Matematicamente, a posição,  $p$ , da partícula  $XP$  de um vetor de dimensão,  $dim$ , é representada no problema de localização como  $XP_p = [m, I_{(m,1)}^{Re}, I_{(m,2)}^{Re}, \dots, I_{(m,H)}^{Re}, I_{(m,1)}^{Im}, I_{(m,2)}^{Im}, \dots, I_{(m,H)}^{Im}]$ .);



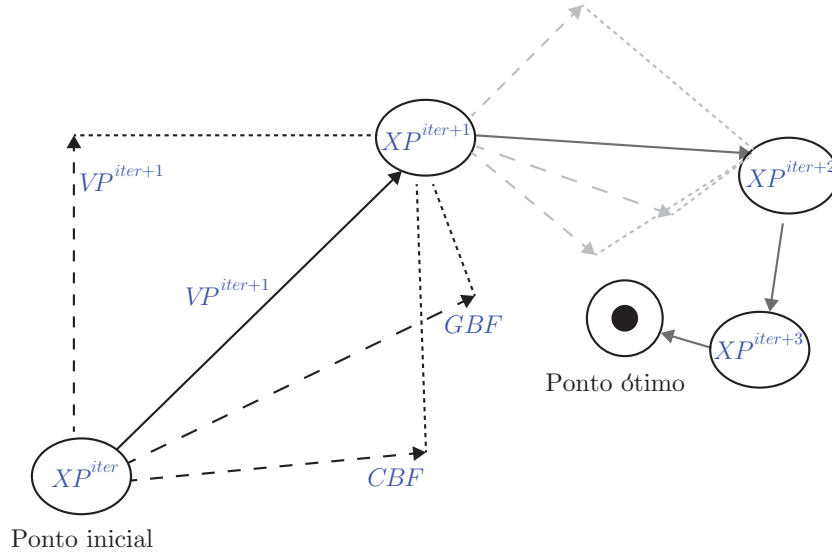


Figura 3.7: Ilustração da movimentação de uma partícula  $XP$  de um ponto inicial até o ponto ótimo.  $XP$  é guiada pela soma com a velocidade  $VP$ , que guia a partícula para o ponto mais viável.

- criar o vetor de velocidade  $VP_p^{dim}$ ;
  - inicializar os vetores melhor viabilidade do *swarm* ( $CBF$ ) e melhor viabilidade global ( $GBF$ ).
2. Atualizar a tensão  $V_c$  para todas posições  $p$ .
  3. Calcular a função objetivo  $OF$ , lembrando que as correntes consideradas correspondem a partícula  $XP_p$ , na posição analisada.
  4. Calcular o  $CBF$ , uma vez que a cada iteração da função objetivo é recalculada para todas as posições do *swarm* e comparada com os valores obtidos na iteração anterior, para que cada posição  $p$  fique com menor valor.

$$CBF_p^{iter+1} = CBF_p^{iter} \quad se \quad OF_p^{iter+1} \geq OF_p^{iter}, \quad (3.52)$$

$$CBF_p^{iter+1} = X_p^{iter+1} \quad se \quad OF_p^{iter+1} < OF_p^{iter}. \quad (3.53)$$

5. Calcular o  $GBF$ , pois a melhor função objetivo é associada com os  $CBF$  entre todas as partículas da iteração atual é comparada com a iteração anterior, sendo a de menor valor escolhida como  $GBF$ .

$$GBF_j^{iter+1} = GBF_j^{iter} \quad se \quad OF_j^{iter+1} \leq OF_j^{iter} \quad (3.54)$$

$$GBF_j^{iter+1} = CBF_j^{iter} \quad se \quad OF_j^{iter+1} < OF_j^{iter} \quad (3.55)$$

6. Atualizar a velocidade baseada nos valores encontrados de  $CBF$  e  $GBF$ , como apresentado em (3.51).
7. Atualizar a posição posição de análise do vetor de variáveis de decisão ( $p$ ) da partícula partícula de PSO ( $XP$ ) para a próxima iteração ( $iter + 1$ ) é dada por:

$$XP_p^{iter+1} = XP_p^{iter} + VP_p^{iter+1}. \quad (3.56)$$

8. Se  $iter = iter_{max}$ , o algoritmo é finalizado, se não, voltar para o passo 3.

### 3.2.6 Solução com Algoritmo de ABC

O ABC, assim com o GA e o PSO, é uma técnica de otimização, em que o enxame de abelhas imita um método natural para encontrar a solução ótima. Isso permite maximizar resultados para mudar elementos básicos do processo. Entretanto, como opera com diferentes tipos de comidas, é facilmente aplicado a solução de localização, visto que as fontes de comida podem representar os PACs para instalação dos APLCs. Diferente das técnicas heurísticas GA e PSO que precisaram ser modificadas para obter resultados satisfatórios. A eficiência do ABC foi comparada a esses algoritmos, e apresentou resultados melhores ou semelhantes, (ABU-MOUTI e EL-HAWARY, 2011). O ABC já foi utilizado para localizar *Static Var Compensator* (SVC) (OTHMAN et al., 2010), *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) (IDRIS et al., 2009) e DGs (ABU-MOUTI e EL-HAWARY, 2011), em SEP.

A ABC foi proposta em (KARABOGA, 2005), baseada no comportamento de abelhas. Assim como todos os algoritmos de inteligência coletiva, a ABC combina um processo de exploração individual com experiências coletivas passadas. No algoritmo ABC, o comportamento das abelhas baseia-se em um modelo matemático composto por quatro componentes essenciais: abelhas operárias, abelhas exploradoras, abelhas seguidoras e fontes de alimento, conforme ilustra a Figura 3.8. As fontes de comida representam as possíveis soluções do problema, enquanto as abelhas são os agentes de busca da solução. As fonte de comida são

os locais viáveis do espaço de busca e contem a solução do problema. A quantidade de fontes é definida como a população do ABC. As abelhas exploradoras procuram aleatoriamente no espaço de busca por fonte de comida. As abelhas operárias buscam por comida nas fontes anteriormente visitadas e em volta de sua vizinhança. As abelhas seguidoras esperam "informações" para escolher qualquer abelha operária para seguir. Um ponto importante a ser destacado desse algoritmo consiste na execução dos passos *forward* e *backward* praticados pelas abelhas a cada iteração. No passo *forward*, as abelhas voam da colméia e escolhem algumas soluções do conjunto de soluções parciais. Já no passo *backward*, todas as abelhas voltam para a colméia. Esse reagrupamento permite que todas as abelhas troquem, com as demais, informações sobre a qualidade das soluções parciais criadas e decida se abandona sua solução e torna-se seguidora novamente, se continua a seguir a mesma solução parcial ou se recruta as companheiras antes de retornar a solução criada, (KARABOGA, 2005). Esses passos são repetidos durante as iterações do algoritmo até que algum dos critérios de parada (por exemplo, número máximo de ciclos) seja atingido.

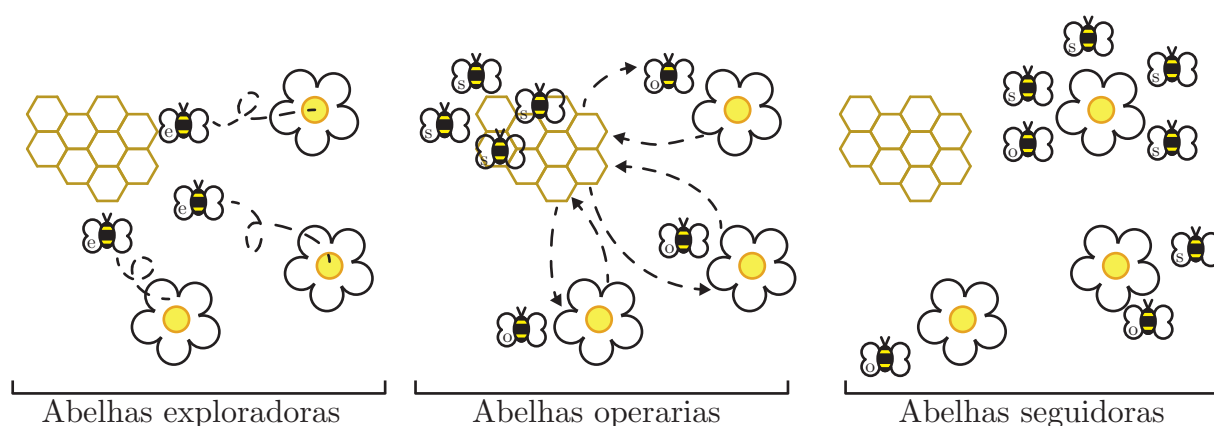


Figura 3.8: Abelhas exploradoras, procuram comida no espaço de busca. Abelhas operárias, coletam comida nas fontes já exploradas por elas mesmas e transmitem a informação de viabilidade (dança) as abelhas seguidoras. Abelhas seguidoras, esperam a dança das abelhas operárias, e seguem para a fonte de comida mais viável.

Os passos do ABC para localização e dimensionamento são descritos a seguir:

1. Gerar a população inicial de  $N$  indivíduos. Cada indivíduo  $x_i$  é uma fonte de comida (solução) e tem  $H$  atributos.  $H$  é a dimensão do problema. Para a localização  $N=16$ , os quais representam o  $m$  pontos de possível instalação de APLC.  $H$  é composto pelas variáveis de decisão, ou seja, as correntes harmônicas de compensação com tamanho

2H.

2. Avaliar a viabilidade de cada indivíduo. Avaliar a  $OF$ .
3. Cada operária, alocada em cada fonte de comida, procura na vizinhança da sua posição atual por uma comida melhor. Então, para cada operária, gerar uma nova solução,  $s_{(i,j)}$  em torno da solução atual,  $x_{(i,j)}$ , em que  $i = 1, \dots, N$ ,  $j = 1, \dots, H$  e  $g = 1, \dots, N$ ,  $l \neq i$ .

$$s_{(i,j)} = x_{(i,j)} + \varphi_{(i,j)}(x_{(i,j)} - x_{(g,j)}) \quad (3.57)$$

4. Calcular a viabilidade de ambas  $x_{(i)}$  e  $s_{(i)}$  e aplicar um número randômico entre  $[-1,1]$  para selecionar o melhor entre eles.
5. Calcular e normalizar os valores selecionados por probabilidade,  $p_{(i)}$  para cada operária,  $x_{(i)}$  utilizando método de seleção da roleta. Isso garante que a seleção proporcional de viabilidade a partir das operárias.
6. Relacionar cada seguidora as abelhas operárias,  $x_{(i)}$  é randômico com probabilidade proporcional a  $p_{(i)}$ .
7. Produzir novas posições de comidas,  $s_{(i)}$  para cada seguidora,  $x_{(i)}$  utilizando operária como  $x_{(g)}$  Equação (3.57).
8. Avaliar a viabilidade de cada espectadora,  $x_{(i)}$  e a nova solução  $s_{(i)}$ . Aplicar o método de seleção para manter um e descartar os outros.
9. Se uma solução particular,  $x_{(i)}$  não melhorou depois de um número de iterações, então selecionar para abandoná-la. Substituir a solução por uma abelha exploradora na fonte de comida coloca uniformemente randômica sobre a procura no espaço utilizando.

$$x_{(i,j)} = \min_{(j)} + rand(0, 1) * (\max_{(j)} - \min_{(j)}) \quad (3.58)$$

10. Continuar procurando pela melhor posição de comida (solução).
11. Verificar a condição de parada. Se a melhor solução encontrada é aceitável ou o máximo número de iteração foi encontrado, para e retorna para a melhor solução até então. Do contrário, voltar para o passo 2 e repetir novamente.

### 3.3 Formulação do problema proposto - Múltiplos APLCs e Múltiplos Cenários

Como vem sendo demonstrado pelos estudos até então apresentados, normalmente, a localização e o dimensionamento são formulados para um único cenário. A escolha do cenário é crítica, visto que a solução de otimização depende do perfil da carga, (GRADY et al., 1992; BRACALE et al., 2011; MAZIN et al., 2011). É importante salientar que solucionar o problema de otimização para múltiplos cenários isoladamente resulta em diferentes soluções para cada cenário, sendo que nem todas representam uma solução viável e realista para o problema de localização.

Nesse sentido, nesta seção é introduzida a formulação e solução para o problema de múltiplos APLCs e múltiplos cenários, no qual a solução compensa a distorção harmônica para as  $2^N$  diferentes combinações de variações de cargas, considerando potência de 0% a 100%.

#### 3.3.1 Função Objetivo

O método de escolha de múltiplos cenários de carga para a instalação de múltiplos APLCs na rede de distribuição começa pelo refinamento da função objetivo, que é dada por:

$$OF_m = \sum_{sc=1}^{scM} \alpha_{(sc)} OF_{(sc)}, \quad (3.59)$$

onde  $OF_{(sc)}$  denota a equação para os  $sc$ -ésimo cenário da Equação (3.44). Nota-se que, a  $OF$  dada pela Equação (3.44) já apresenta uma matriz  $(k, m, h)$ , logo adicionando mais um parâmetro, cenários  $sc$ , aumentará a complexidade do problema. Portanto, para simplificar a análise, uma avaliação combinacional e sequencial dos cenários críticos é proposta.

Dessa forma, na proposta de múltiplos cenários a solução é definida por:

$$I_{(sc)} = [I_{(sc,m,H)}, \dots, I_{(sc,M,H)}],$$

em que  $sc = [1, \dots, scM]$ , e  $scM$  é o número máximo de cenários.

O conjunto de soluções  $I_{(sc)}$  considera somente PACs viáveis, que são os que satisfazem os níveis de distorção harmônica. As soluções viáveis são classificadas em termos de valores

de  $HTLL$  e  $IF$ , e então armazenadas para comparação com a solução dos demais cenários. O índice de classificação  $i_Q(I_{sc})$  é definido como:

$$i_Q(I_{sc}) = \sum_{sc=1}^{scM} \frac{\alpha f_{HTLL(sc)} + \beta f_{IF(sc)}}{\alpha + \beta}, \quad (3.60)$$

na qual  $f_{HTLL(sc)}$  e  $f_{IF(sc)}$  denotam o  $HTLL$  e  $IF$  calculados para o  $sc$ -ésimo cenário, respectivamente, e  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes. A Figura 3.9 ilustra três cenários diferentes. O problema de localização e dimensionamento foi solucionado e os resultados viáveis de cada cenário foram armazenados e classificados. O PAC 3 apresentou o menor  $i_Q(I_{sc})$ . Esse exemplo explica o procedimento básico da solução proposta, Figura 3.9. Seguindo esse procedimento é possível obter os pontos de localização e o dimensionamento dos APLCs, que satisfaçam os níveis de THD e IHD com corrente e perdas mínimas para qualquer variação de carga.

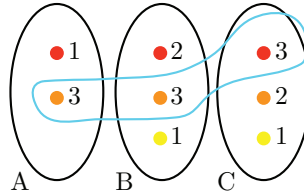


Figura 3.9: Representação de múltiplos cenários. No caso existem três cenários, A, B e C. Três localizações foram consideradas, mas no cenário A, PAC 2 não satisfaz as restrições de distorção harmônica. Portanto, PAC 3 é o melhor ponto de instalação, pois somando os três cenários é o que apresenta menor  $i_Q(I_{sc})$ .

### 3.3.2 Obtenção dos cenários críticos

A representação da variação dinâmica dos elementos do SEP, deve representar as  $2^N$  diferentes combinações de variações considerando potência de 0% a 100%, (GEHRKE et al., 2010b; GEHRKE et al., 2010a; GEHRKE et al., 2012b). De acordo com o estudo proposto em (GRADY et al., 1991; SAINZ e BALCELLS, 2012), o pior caso é representado por uma carga de alta potência em um único PAC. Ou seja, caso somente uma carga com alta potência seja instalada, provavelmente o melhor ponto de instalação do APLC será no PAC da carga ou próximo a ele. Dessa forma, para cada cenário uma localização diferente seria necessária. (GRADY et al., 1991).

Portanto, os cenários críticos são obtidos para cada PAC com uma carga máxima. São obtidos  $sc$  cenários, sendo o número máximo de cenários definido por  $scM = k$ . Para obter

os valores de tensão de cada cenário, considerando um cenário uma carga de alta potência por PAC, um procedimento sequencial foi implementado.

### 3.3.3 Restrições

Além das restrições já consideradas na formulação do problema um APLC e um cenário, inequações (3.10), (3.11) e (3.12), também foram incluídas as restrições da corrente quantizada. Para considerar o conjunto de correntes discretas, as magnitudes e ângulos de fase são sujeitos a:

$$\left| \hat{I}_{(m,h)} \right| = \left\lfloor \frac{|I_{(m,h)}|}{\delta I} \right\rfloor \delta I, \quad (3.61)$$

$$\angle \hat{I}_{(m,h)} = \left\lfloor \frac{\angle I_{(m,h)}}{\delta \theta} \right\rfloor \delta \theta, \quad (3.62)$$

onde  $\lfloor x \rfloor$  denota o maior inteiro, não maior que  $x$ .

### 3.3.4 Solução para múltiplos cenários

Para solucionar o problema com múltiplos cenários os algoritmos heurísticos apresentados para um único cenário podem ser completados.

Algoritmo:

1. Iniciar a variável  $sc$ .
2. Iniciar a matriz das tensões, Figura 3.10:  $v_{(k,h)} = v_{sc}$ .

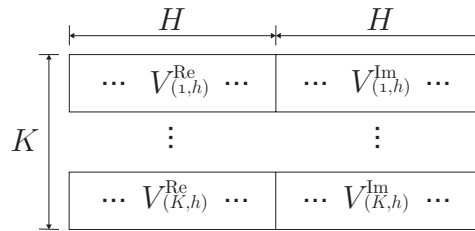


Figura 3.10: Vetor composto com as variáveis de decisão.

3. Aplicar um algoritmo de otimização.
4. Verificar as restrições:  $THD > 5\%$  e  $IHD > 3\%$ , caso não, aumentar o número de APLCs, volta para o item 3, caso sim, armazena todas as soluções viáveis,  $I_{sc}$ .

5. Atualizar o valor de  $sc$ .
6. Se  $sc < scM$ , voltar para o passo 2, se não, seguir para o próximo passo.
7. Calcular  $i_Q(I_{sc})$  e definir os pontos de instalação de APLCs.
8. O algoritmo é finalizado.

### 3.4 Resultados da localização e dimensionamento

Nesta seção serão apresentados os resultados da aplicação das técnicas de otimização desenvolvidas para localização e dimensionamento de APLCs. Para realização deste estudo de caso será considerado, como rede elétrica base, o sistema teste de 18 barras divididas em 2 ramos da IEEE, Figura 3.11. Este SEP foi escolhido, pois foi apresentado em outros trabalhos (GRADY et al., 1991; CHANG e GRADY, 1997; KEYPOUR et al., 2004; ZIARI e JALILIAN, 2010), assim servindo de base de comparação para os resultados obtidos neste trabalho.

O sistema de distribuição foi implementado em Simulink/SimPowerSystems. As formas de onda das tensões dos PACs, ( $k = 1, \dots, 16$ ) para cada cenário são exportadas para o MATLAB. Ademais, um algoritmo foi implementado para converter as tensões no domínio do tempo para o domínio da frequência para os harmônicos selecionados ( $h = 2, \dots, 25$ ). As soluções do problema de localização e dimensionamento baseadas no algoritmo proposto em (CHANG e GRADY, 1997) (posteriormente denominado somente como tradicional), e nos algoritmos heurísticos GA, PSO e ABC também foram implementadas. Foram considerados 15 diferentes cenários no estudo ( $sc = 1, \dots, 15$ ), os quais representam as piores condições de operação para aplicar a solução.

#### 3.4.1 SEP estudado

Na Figura 3.11 é ilustrado o SEP modelo da IEEE. O diagrama apresenta um sistema com 18 PACs/barras, as quais, 16 (1-9 e 20-26) são de 12.5 kV e 2 barras (50-51) 138 kV. A solução foi avaliada em por unidade (p.u.), portanto, consideraram-se as base de potência e tensão iguais a 10 MVA e 12.5 kV, respectivamente.



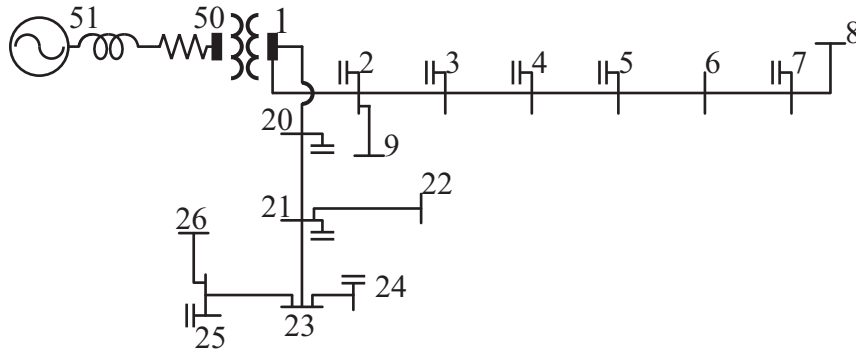


Figura 3.11: SEP de 18 barras da IEEE

Nos artigos estudados, o SEP foi resolvido com programas de fluxo de carga para harmônicos, porém para uma melhor integração com a eletrônica de potência, o sistema foi simulado em ambiente MATLAB/Simulink. Para tanto, as cargas não lineares foram representadas como fontes ideais de corrente, representados em p.u. para uma potência igual a 3 MW são dados na Tabela 3.1, apresentada em (GRADY et al., 1991).

Tabela 3.1: Amplitude da corrente por cada harmônico, considerando a corrente de uma carga não linear de 3 MW.

$h$	5	7	11	13	17	19	23	25
$I_{(h)}$ (p.u.)	0,080	0,040	0,030	0,020	0,018	0,016	0,014	0,010

Os segmentos de linha foram representados como segmentos  $\pi$ , cujos valores foram apresentados em (GRADY et al., 1991), e são apresentados no Apêndice A. Considerando  $w = 2 * \pi * 60$ , os valores de resistência são iguais a  $R$ , de indutância ( $L = x_L/w$ ) e capacitância ( $C = Q_c/(V^2w)$ ). A potência ativa das cargas são representadas por resistores, portanto ( $R_L = V^2/P$ ), e reativa por indutores, ( $L_L = V^2/Q$ ). Os bancos de capacitores por ( $C_b = Q_b/(V^2w)$ ). A partir desse cenário, os resultados sem APLC são apresentados na Tabela 3.2.

### 3.4.2 Obtenção dos dados do SEP

Os dados de entrada são: o número de PACs no SEP; a máxima distorção harmônica permitida; o número máximo de unidades de APLCs; as restrições do APLC, isto é, potência máxima e a quantização da corrente; a impedância dos SEPs, que é baseada no material e distância do cabo. Esses dados devem ser apresentados para todos os harmônicos selecionados, os quais são determinados de acordo com o tipo de carga instalada no SEP. Como

Tabela 3.2: Resultados em MATLAB/Simulink para o sistema IEEE de 18 barras

$k$	$THD$ %	$k$	$THD$ %
1	2,7220	9	3,4419
2	3,4419	20	3,1215
3	4,1516	21	4,1361
4	4,4736	22	4,1369
5	5,4324	23	5,7003
6	5,5562	24	6,7830
7	5,9579	25	6,3958
8	5,9569	26	6,3960

a formulação é dada em função da distorção de tensão, Equação 3.39, esse dado deve ser obtido para todos os PACs. Essa informação deve representar a operação do SEP e deve incluir a variação de cargas e banco de capacitores.

A variação de cargas no SEP é dinâmica e para representá-la um procedimento sequencial foi implementado. Esse procedimento representa os piores cenários de acordo com (GRADY et al., 1991; SAINZ e BALCELLS, 2012), em que somente uma carga de alta potência está instalada em um único PAC. Dessa forma, para cada cenário uma localização diferente seria necessária, (GRADY et al., 1991). Para obter os dados do SEP, uma simulação controlada por um algoritmo foi implementada, Figura 3.12.

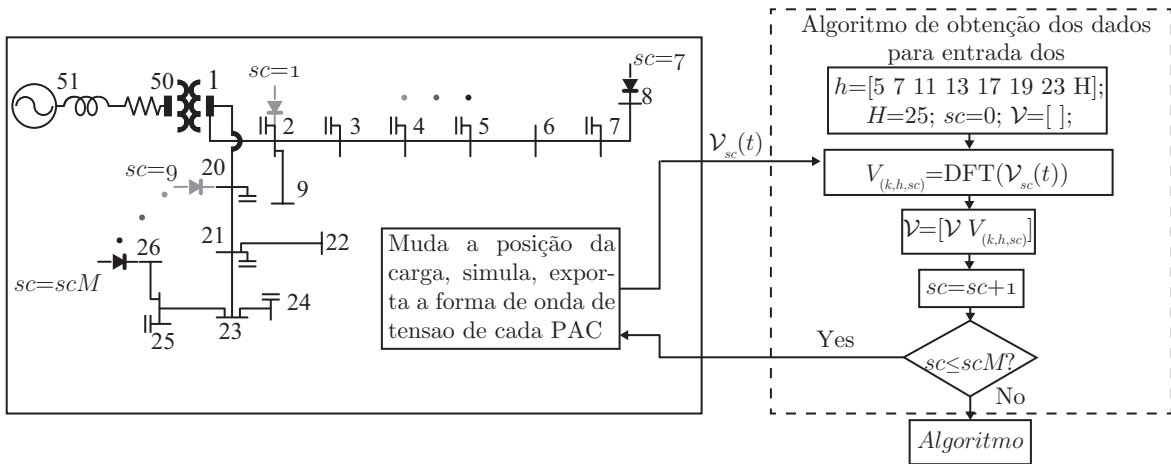


Figura 3.12: Todos os cenários do SEP são simulados considerando carga máxima permitida em cada PAC. Cada ciclo de tensão ( $\mathcal{V}_{sc}(t) = [v_{PCC_1}(t), \dots, v_{PCC_{16}}(t)]$ ) é exportado para o algoritmo que, a partir da DFT janelada, transforma a tensão no tempo para frequência resultando em um vetor multidimensional  $\mathcal{V}$ .

Esse método é eficiente se não existe dados de medições das tensões dos PACs do SEP.

Entretanto, se existem esses dados da forma de onda da tensão, e ou, dados da tensão nas ordens dos harmônicos selecionados, é possível utilizar esses dados como entrada de tensão no algoritmo.

### 3.4.3 Análise dos índices da $OF$ e soluções de otimização

Para verificar a influência dos índices da  $OF$ , Equação (3.44), um cenário foi escolhido, o qual consiste em uma carga de 4,5 MW no PAC  $k = 5$ , sendo a parcela da potência harmônica de 152 kVA. Nesta seção serão analisados os índices de qualidade de energia, THD, IHD e HTLL, e as soluções dos algoritmos, considerando o problema sem e com restrição de corrente, Equação (3.10), e em seguida com a imposição da corrente quantizada, Equações (3.61) e (3.62).

A primeira análise considerou o caso com restrição da corrente eficaz de compensação, avaliando a variação da localização e da corrente, assim como os índices de qualidade de energia. A melhor solução, para esse caso sem restrição de corrente, é aquele que consegue reduzir ao máximo os índices da  $OF$ . Para esse cenário, com uma carga de alta potência em  $k=5$ , espera-se que o melhor resultado seja na mesma posição da carga. O resultado dos pontos de localização por parâmetro, considerado o problema sem restrição de corrente, pode ser analisado na Tabela 3.3. Avaliando os níveis de THD, IHD e HTLL, a maior redução foi apresentada quando o APLC foi alocado na posição  $m=5$ , entretanto, quando o parâmetro  $IF$  é avaliado individualmente, nota-se que a menor corrente é apresentada em  $m=7$ . Pela análise do somatório da  $OF$ , Equação 3.44, o resultado do ponto ótimo é  $m=5$ .

Tabela 3.3: Avaliação da localização do APLC frente a diferentes índices com corrente máxima.

Índices	$THD$	$IHD$	$HTLL$	$IF$
Localização ( $m$ )	5	5	5	7

O ponto ótimo,  $m=5$ , foi comparado ao segundo melhor PAC,  $m=7$ . Para o PAC,  $m=5$ , o nível de distorção harmônica foi reduzido para  $THD_{(5)}=2,4\%$ , enquanto no segundo melhor PAC foi de  $THD_{(7)}=3,3\%$ . Contudo, o valor de corrente para  $m=5$  foi superior ao  $m=7$ ,  $I_{(5,H)}=0,1466$  p.u. e  $I_{(7,H)}=0,1295$  p.u., respectivamente.

Para analisar melhor o resultado, todos os valores de amplitude para os harmônicos

selecionados são apresentados na Tabela 3.4, e a forma de onda da corrente de compensação é ilustrada pela Figura 3.13. Observa-se que, para a maioria das ordens harmônicas, os valores obtidos para  $m=5$  são maiores (destacados em negrito), assim como na forma de onda, apresenta valores de picos maiores.

Tabela 3.4: Comparação da amplitude da corrente sem restrição para o PAC 5 e para o PAC 7 considerando os harmônicos selecionados. Em destaque as correntes com maior amplitude por harmônico.

$h$	5	7	11	13	17	19	23	25
$m=5$	<b>0,1203</b>	<b>0,0742</b>	0,0104	<b>0,0203</b>	<b>0,0153</b>	<b>0,0222</b>	0,0030	<b>0,0161</b>
$m=7$	0,1044	0,0716	<b>0,0166</b>	0,0125	0,0061	0,0140	<b>0,0067</b>	0,0048

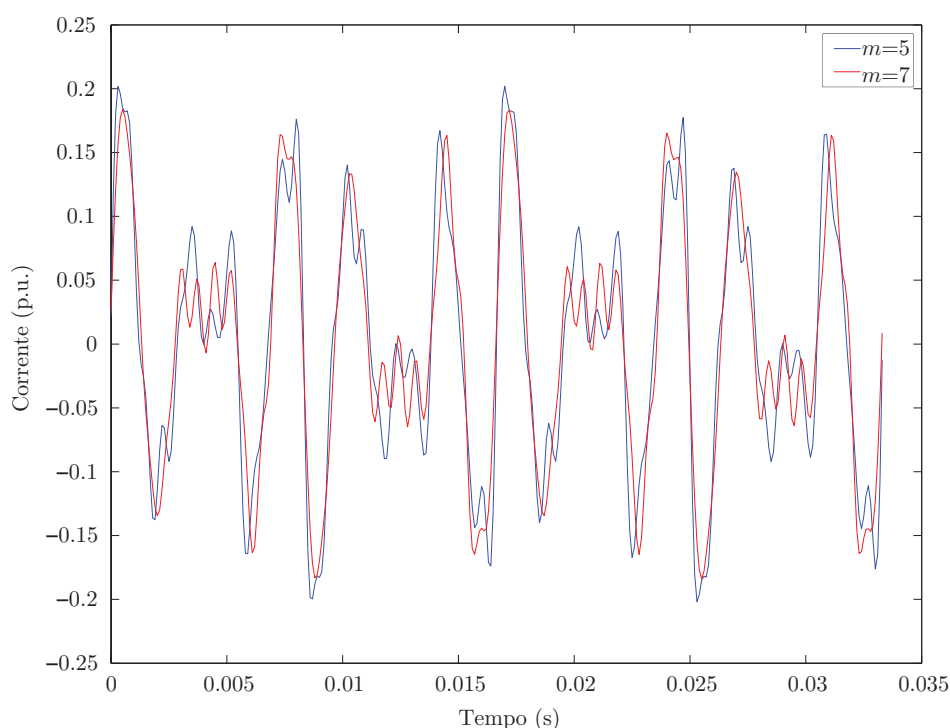


Figura 3.13: Forma de onda das correntes obtidas resolvendo problema de otimização sem considerar nenhum tipo de restrição. A forma de onda da corrente é dada por  $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H |I_{(m,h)}| \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ .

A segunda análise solucionou o problema considerando o ponto ótimo aquele que apresenta perdas e corrente mínima. Nesse caso, a corrente e a distorção harmônica são consideradas como restrição. O valor de corrente não pode ser maior que o máximo estipulado e deve ser minimizada ao mínimo, enquanto as restrições de THD e IHD devem ser satisfeitas, e assim que o valor é atingido, essas são consideradas praticamente nulas pela análise da função de viabilidade. Pela análise da Tabela 3.5 percebe-se que todos os índices sugerem a

mesma localização, no PAC  $k = 7$ , quando o objetivo é obter a mínima corrente e mínimas perdas.

Tabela 3.5: Avaliação da localização do APLC frente a diferentes índices com corrente mínima.

Índices	THD	THD	HTLL	$IF$
Localização	7	7	7	7

A comparação dos níveis de corrente foram feitos com o  $m=5$ , para comparar com os resultados anteriores. Considerando restrição de corrente os níveis de distorções foram reduzidos para,  $THD_{(5)}=4,97\%$  e  $THD_{(7)}=4,99\%$ . Nota-se, que esses valores de distorção são superiores aos apresentados no caso sem restrição de corrente, entretanto, esses satisfazem a norma e resultaram em uma redução maior no valor da corrente eficaz,  $I_{(5,H)}=0,0734$  p.u. e  $I_{(7,H)}=0,0704$  p.u.. Os valores das amplitudes por harmônicos podem ser observados na Tabela 3.6. Quando comparada a Tabela 3.4, todos os valores são menores. Em relação a forma de onda, Figura 3.14, quando comparada com os resultados da Figura 3.13, em que os valores dos picos atingiram 0,2 p.u., é possível observar que o nível da corrente eficaz e os valores dos picos de corrente reduziram, não alcançando os 0,1 p.u., limite estipulado para a solução.

Tabela 3.6: Comparação da amplitude da corrente com restrição para o PAC 5 e para o PAC 7 considerando os harmônicos selecionados. Em destaque as correntes com maior amplitude por harmônico.

$h$	5	7	11	13	17	19	23	25
$m=5$	<b>0,0848</b>	<b>0,0792</b>	<b>0,0377</b>	<b>0,0177</b>	<b>0,0174</b>	0,0098	<b>0,0208</b>	0,0076
$m=7$	0,0761	0,0551	0,0212	0,0121	0,0113	<b>0,0191</b>	0,0162	<b>0,0127</b>

Como o esperado, quando avalia-se a localização com correntes máximas, a maior redução da distorção harmônica será apresentada no PAC de instalação da carga, visto que o cenário tem somente uma carga, uma vez que eliminando os harmônicos da carga o SEP não tem mais nenhuma fonte de harmônicos. Todavia, quando a análise avalia a mínima corrente, um conhecimento maior da relação das impedâncias é necessário. A redução da corrente é significativa (53%), quando os valores das distorções harmônicas consideram a norma e não são minimizados ao mínimo. A partir dos resultados apresentados em relação aos índices de qualidade foi concluído que todos, por dependerem das mesmas variáveis, convergem para

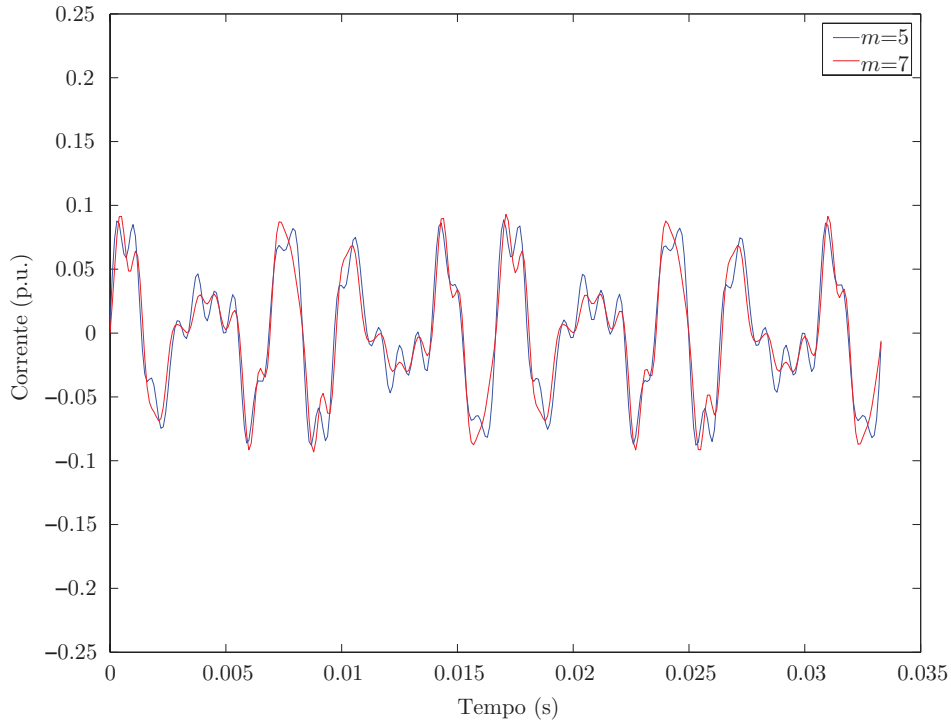


Figura 3.14: Forma de onda das correntes obtidas resolvendo problema de otimização considerando restrições de corrente e THD. A forma de onda da corrente é dada por  $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H |I_{(m,h)}| \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ .

um mesmo ponto ótimo, portanto, podem ser utilizados juntos que tenderão a cooperar uns com os outros.

Além da influência da restrição de corrente, também foi proposta a avaliação da corrente quantizada. Para avaliar o efeito desse parâmetro o mesmo cenário foi avaliado. Foram considerados dois testes: Teste 1: corrente constante; Teste 2: corrente quantizada.

Esses testes foram avaliados para todas as soluções do problema apresentadas: solução tradicional e heurísticas, GA, PSO e ABC. Como descrito anteriormente, para calcular a corrente de compensação para um determinado PAC, o método tradicional é baseado em iterações, sendo que a cada passo a corrente é aumentada um pouco, alocando APLCs no mesmo PAC ou em outro. Esse procedimento é repetido até a máxima corrente ser atingida ou os níveis de distorção harmônica serem satisfeitos. Apesar de aumentar a corrente de gradativamente, nesse método não existe restrições explícita de corrente quantizada (amplitude e fase). Logo, para comparar com os algoritmos heurísticos, as restrições de corrente, (3.61) e (3.62), foram adicionadas ao algoritmo.

A corrente máxima é definida como  $I_{\max} = 0,15$  p.u.. A corrente quantizada, conside-

Tabela 3.7: Corrente de compensação obtida pelo método tradicional. A corrente complexa no PAC  $m$ -ésima é dada por  $i_{m,H}(t) = \sum_{h=5}^H |I_{(m,h)}| \sin(h\omega t + \angle I_{(m,h)})$ .

Harmônico ( $h$ )	Corrente contínua fasor ( $I_{(m,h)}$ )	Corrente Quantizada fasor ( $I_{(m,h)}$ )
5	0,08030593 - j0,0051176	0,08030000 - j0,00000000
7	0,04280156 + j0,0310018	0,04280000 + j0,03100000
11	0,01461499 - j0,0000020	0,01460000 - j0,00000000
13	0,00424620 + j0,0059532	0,00420000 + j0,00600000
17	0,00635582 - j0,0006157	0,00640000 - j0,00000000
19	0,00455917 + j0,0070008	0,00460000 + j0,00700000
23	-0,00221807 + j0,0006985	0,00000000 + j0,00070000
25	-0,00485146 + j0,0013399	0,00000000 + j0,00130000

rando os parâmetros descritos no refinamento do APLC:  $L=10$  mH,  $m_a=0.95$ ,  $f_{sw}=10$  kHz, é de  $\delta I=0,001$  p.u..

A corrente de compensação obtida pelo método tradicional é apresentada na Tabela 3.7. Com essa corrente a distorção harmônica foi reduzida para THD= 4,96%. Considerando a quantização da corrente somente no final do algoritmo, aplicando  $\delta I=0,001$  p.u., Tabela 3.7, o nível de distorção total não é satisfeito, THD= 5,32%. Isso acontece, pois somente valores positivos foram impostos, porém quando os valores restritos são combinados com a impedância equivalente no PAC e a tensão medida, o valor resultante apresenta maior THD.

A Tabela 3.8 apresenta os resultados dos algoritmos considerando as Equações (3.61) e (3.62) adicionadas no algoritmo. Como os resultados em relação a amplitude e fase são alterados para cada cenário, somente o dimensionamento da corrente eficaz será considerado nos próximos resultados. Observa-se que a solução tradicional não apresenta o desempenho desejado quando é imposto uma corrente quantizada à solução, o que resultou na alocação de mais um APLC. Quando é imposto corrente quantizada à formulação, essa fica mais complexa e apresenta mais pontos mínimos como solução. A solução tradicional, por depender de derivadas, variar com passos fixos e não apresentar conjuntos iniciais para a solução, não responde bem a essas restrições. As soluções heurísticas, quando inicializadas, já integram a restrição de corrente, pois essa é uma imposição da formação do conjunto de variáveis de decisão. Esse conjunto de variáveis são calculados com passos variados e forma um conjunto de soluções, o que facilita a solução do problema.

Resultados do número de iterações para solucionar o problema são ilustrados na Fi-

Tabela 3.8: Minimização da  $IF$ .

	Teste 1	Teste 2
Tradicional	7(0,098)	7(0,088) e 24(0,009)
GA	7(0,087)	7(0,090)
PSO	7(0,065)	7(0,079)
ABC	7(0,071)	7(0,074)

gura 3.15. No GA, a imposição da corrente quantizada foi solucionada com êxito, melhorou o desempenho do algoritmo (menor número de iterações, quando comparado a solução com corrente contínua) e aumentou somente em 4% o valor da corrente eficaz. Em PSO, com a alteração para a corrente quantizada o problema também foi solucionado com êxito, e a corrente obtida foi menor que a obtida com GA, sendo que o aumento de corrente em relação a solução contínua foi maior e igual a 17%. A solução do ABC, assim como as outras soluções heurísticas, a restrição de quantização aumentou o valor da corrente, elevando o valor em 5%, entretanto, essa solução apresentou a menor corrente quantizada comparado aos demais métodos. Nota-se que para todas as soluções heurísticas, o aumento da complexidade, com a imposição da corrente quantizada, resultou em um leve aumento da corrente resultante quando comparado a corrente contínua. Isso é explicado pela restrição das combinações de corrente, sendo que com corrente contínua todos os valores são possíveis, Tabela 3.8.

Analisando a Figura 3.15 também é possível analisar que o número de iterações foi menor para todos os métodos, pois o espaço de soluções é menor. Com a imposição da corrente quantizada, o GA obteve a resposta com menos iterações ( $iter = 3$ ) e, conseqüentemente, menor tempo de resposta ( $t = 10,21 s$ ), resultando em uma redução de mais de 50 % do tempo. O PSO também apresentou redução de iterações ( $iter = 16$ ) e tempo de resposta ( $t = 12,11 s$ ), resultando em uma redução de mais de 50 % em tempo e iterações. O ABC também reduziu um pouco o tempo de resposta. Nota-se que, os tempos para cada algoritmo variam dependendo da codificação da atualizar a variável de decisão e do número de iterações. A imposição da corrente quantizada minimiza o tempo de resposta dos algoritmos e aproxima a resposta a resultados reais, visto que, o APLC tem um  $di/dt$  fixo pelo parâmetros de construção e variáveis de operação.

Como mencionado anteriormente, a solução tradicional apresenta respostas mais rápidas que as soluções heurísticas, entretanto, o problema não precisa ser solucionado instantane-



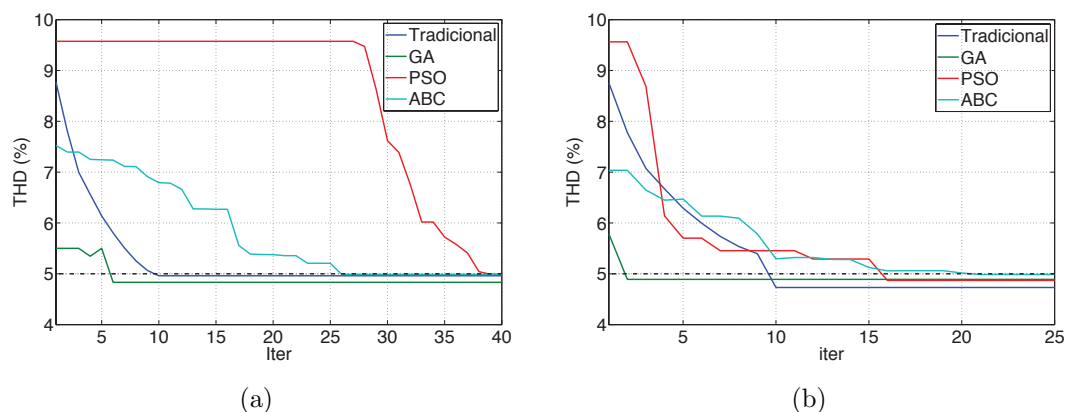


Figura 3.15: Número de iterações para obtenção das soluções considerando: a) corrente contínua e b) corrente quantizada.

amente, mas sim com maior precisão. Por isso, foram estudados os algoritmos heurísticos como solução para o problema. Os algoritmos heurísticos variam o tempo de solução, pois dependem da codificação adotada apresentam custos computacionais distintos entre si para cada iteração que realizam. Em relação a análise das soluções heurísticas, é possível determinar que o GA é mais efetivo, pois resolve o problema com menos iterações, enquanto o ABC é rápido, pois mesmo com mais iterações apresenta tempo de resposta semelhante ao GA. Além disso, o ABC difere dos outros algoritmos heurísticos, pois têm características intrínsecas para localização de soluções ótima, que são representadas pelas fontes de comidas, e o dimensionamento é obtido com informações mais viáveis entre todas as fontes. Em relação ao problema de minimização da corrente de compensação a solução baseada em ABC também apresentou melhor desempenho, e como, atinge a resposta no mesmo tempo que o GA e o PSO, apresenta a melhor opção como algoritmo para localizar e dimensionar APLCs. Os resultados a seguir serão apresentados a solução de ABC.

### 3.4.4 Cenários estudados

Para instalar APLCs de forma que, mesmo com a variação de cargas do SEP, seja possível satisfazer as normas para todos os PACs, são estudados 15 diferentes cenários. Com esse estudo, o resultado da localização de APLCs satisfaz as normas de THD e IHD independente das mudanças de cenário que o SEP apresenta em condições reais. Observa-se que os cenários alteram as cargas não lineares, entretanto, as cargas lineares permanecem constan-

tes. Avaliou-se cargas com potência elevada, como descrito na metodologia de obtenção de cenários, pois essas são as mais difíceis de compensar com APLCs instalados em pontos longe da carga. Os índices analisados são: máxima distorção harmônica total (*Maximum Total Harmonic Distortion*) (*mTHD*), dada pela equação (3.63); distorção harmônica total média (*average Total Harmonic Distortion*) (*aTHD*), expressa pela equação (3.64), máxima distorção harmônica individual (*Maximum Individual Harmonic Distortion*) (*mIHD*), descrita por (3.65); HTLL, equação (2.20).

$$mTHD = \max(THD_{(k)}) \quad (3.63)$$

$$aTHD = \sum_{k=1}^N \frac{THD_{(k)}}{N} \quad (3.64)$$

$$mIHD = \max(IHD_{(k,h)}) \quad (3.65)$$

## Ramo 1

O estudo dos 15 cenário é dividido em dos ramos conforme o SEP. Primeiro o Ramo 1, PACs de 2 a 9, é estudado. Neste Ramo são 8 cenários, avaliando somente uma carga de 4,5 MW, no qual a potência harmônica equivale a 152 kVA. As correntes apresentadas na Tabela 3.1 representam uma carga de potência de 3 MW, por isso os valores utilizados nesse estudo são calculados multiplicando os valores da tabela por 1,5. Dessa forma, a corrente eficaz resultante é de 0,1513 p.u.. A carga foi alocada em diferentes PACs, mudando de um em um, do PAC 2 até o 9. Na Tabela 3.9 são apresentados os valores de todos os índices de qualidade de energia, para todos PACs, antes da localização dos APLCs.

Tabela 3.9: Ramo 1 - Resultados sem APLC

PAC	<i>mTHD</i> %	<i>aTHD</i> %	<i>mIHD</i> %	HTLL %
2	6,8354	5,6460	6,2603	1,6096
3	7,6438	5,9781	7,3415	1,8591
4	8,1749	6,0025	7,8451	1,9055
5	9,7298	6,9729	9,0629	2,8547
6	8,1749	6,0025	7,8451	1,9055
7	10,291	8,0296	9,4258	4,5551
8	11,855	8,0974	9,3690	4,7697
9	6,8891	5,7038	6,2507	1,7313

## Ramo 2

O Ramo 2 foi estudado da mesma forma que o Ramo 1, com a mudança da carga de um PAC para outro, obtendo-se resposta para cada alocação da carga. Entretanto, foi estudado no Ramo 2, barramentos 20 a 26. O resultado do cálculo dos índices de qualidade de energia neste cenário é dado na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Ramo 2 - Resultados sem APLC

PAC	$mTHD$ %	$aTHD$ %	$mIHD$ %	$HTLL$ %
20	8,0511	5,5354	6,1405	1,1196
21	9,4267	6,9410	6,9083	1,7300
22	9,9339	6,1242	6,3650	1,5012
23	9,6708	7,2905	8,1235	1,6964
24	11,969	9,1939	9,4257	3,7331
25	10,100	8,5678	8,9715	3,8506
26	10,151	8,5657	8,9648	3,8140

### 3.4.5 Resultados

Os resultados foram obtidos considerando as soluções para cenários individuais (em que a solução de um cenário não auxilia nas soluções dos demais) e para múltiplos cenários (em que as informações de um cenário são compartilhada com os demais). O problema de localização e dimensionamento de múltiplos APLCs foi solucionado, minimizando os índices da função objetivo e satisfazendo as restrições de THD e IHD regulamentadas pela norma (IEEE-STD.519, 1993) e a restrição de corrente para todos os cenários.

Para todas a solução,  $IF$  é quantizada. Por exemplo, se 0,01 p.u. é considerado uma unidade de corrente, caso um PAC seja dimensionado com  $I_m = 0,04$  p.u., considera-se que possui quatro unidades de corrente. As unidades de corrente também são somadas para todos os PACs do SEP, ou seja, se o resultado apresenta  $I_2 = 0,02$  p.u. e  $I_3 = 0,03$  p.u., no total são cinco unidades de corrente.

### Localização

A primeira análise de localização foi para o Ramo 1, considerando uma carga não linear de 4,5 MW, variando a alocação do PAC 2 a 9. Solucionando os cenários individuais

considerando a mínima corrente de 0,001 p.u. (12,5kV e 10MVA). A localização ótima para cada solução de cenário individual é apresentada, comparativamente, na Tabela 3.11. Em que o campo PAC indica em qual PAC a carga está instalada.

Tabela 3.11: Ramo 1 - Resultado de localização com solução de cenários individuais.

PAC	2	3	4	5	6	7	8	9
Localização do APLC $m$	2	5	7	8	8	8	8	2

Analisando a Tabela 3.11, observa-se que para cada cenário e para cada solução foram apresentadas localizações diferentes, totalizando 4 PACs para instalação de APLCs. Se considerarmos, que praticamente em todos os PACs há necessidade de um APLC instalado, em um cenário real essa solução seria inviável. Entretanto, sabe-se que, a localização é baseada em mínima corrente que apresenta maior redução dos índices da  $OF$ , portanto, pode-se considerar pontos próximos aos ótimos como pontos quase ótimos. Quando os pontos subótimos individuais são considerados pode-se encontrar a solução global dos somatórios de todos os cenários. Para isso, foi implementado uma combinação, das soluções das localizações de todos os cenários. Essa metodologia de alocar carga com alta potência nos PACs do SEP foi proposta e chamada de solução de múltiplos cenários. O resultado é dado pela Equação (3.60). Na Tabela 3.12 são apresentados os resultados considerando a solução de múltiplos cenário para o Ramo 1.

Tabela 3.12: Ramo 1 - Resultado de localização com solução de múltiplos cenários.

PAC	2	3	4	5	6	7	8	9
Localização do APLC $m$	7	7	7	7	7	7	7	7

Na Tabela 3.12 é notória a redução de PACs para a alocação de APLCs, pois na solução do problema de múltiplos cenários determinou somente 1 ponto para instalação dos compensadores, uma redução de 3 unidades, quando comparado com a solução individual.

A mesma análise foi repetida para o Ramo 2, logo, a priori, a análise com as soluções de cenário isolados, Tabela 3.13, em que 5 localizações foram identificadas.

Tabela 3.13: Ramo 2 - Resultado de localização com solução de cenários individuais.

PAC	20	21	22	23	24	25	26
Localização do APLC $m$	20	21	22	25	24	25	25

Em seguida, o problema foi solucionado com a solução de múltiplos cenários, Tabela 3.16. Para esse Ramo também houve redução de pontos de instalação, nos quais foram identificados 3 pontos ótimos, ou seja, 3 a menos que a solução individual. Quando somados os APLCs localização no Ramo 1 e no Ramo 2 com a solução individual, seriam necessários 9 compensadores, com a solução de múltiplos cenários esse número foi reduzido a 5 compensadores.

Tabela 3.14: Ramo 2 - Resultado de localização com solução de múltiplos cenários.

PAC	20	21	22	23	24	25	26
Localização do APLC $m$	21	21	21	25	24	25	25

Os PACs resultantes da localização para o SEP em estudo são: 7, 21, 24 e 25. O dimensionamento dos APLCs [para todos os cenários são analisadas a seguir.

## Dimensionamento

O dimensionamento é analisado nesta seção, os resultados indicam o ponto de instalação  $m$  e a corrente resultante emp.u..

A primeira análise foi implementada no Ramo 1 composto de 8 cenários. Para cada cenário, é apresentada a corrente mínima necessária para que a restrição de THD fosse satisfeita. Na Tabela 3.15 são apresentados os resultados do Ramo 1. Analisando a Tabela observa-se que todos os cenários são solucionados com o APLC alocado em  $m=7$ . Foi possível solucionar todos os cenários com apenas um APLC, pois a solução ótima é obtida considerando a solução de múltiplos cenários, Equação (3.60). A corrente mínima é de 0,115 p.u., o que representa em corrente real de aproximadamente 9 A, ou seja, potência de 115 kVA (considerando os valores de base 10 MW e 12.5 kV).

A segunda análise foi implementada no Ramo 2, em que as respostas são apresentadas na Tabela 3.16. A potência foi distribuída entre os APLCs alocados em,  $m = 21, 24, 25$ . Utilizando o mesmo raciocínio anterior, de corrente real para encontrar a potência, é possível estimar a potência mínima dos APLCs. No APLC instalado em:  $m = 21$  (52 kVA),  $m = 24$  (49 kVA) e  $m = 25$  (69 kVA). No Ramo 2, a seleção do PAC 21 foi devida a aplicação da Equação (3.60), pois os 3 cenários ( $sc=20,21,22$ ) poderiam ser solucionados com diferentes localizações do APLC, entretanto,  $m=21$  apresentou o valor mínimo para o dimensionamento

Tabela 3.15: Ramo 1 - Resultado da localização do APLC e da corrente eficaz, entre parênteses, para soluções de múltiplos cenários.

PAC	$m$ (p.u.)
2	7(0,036);
3	7(0,048);
4	7(0,051);
5	7(0,071);
6	7(0,053);
7	7(0,085);
8	7(0,115);
9	7(0,035);

e mínimas perdas. Quando comparado ao  $m=22$ , reduziu em 6% o dimensionamento, de 0,075 p.u. ( $m=22$ ) para 0,071 p.u. ( $m=21$ ). Observa-se que somente no cenário 23 o APLC é alocado em  $m=24$ , mas nesse caso, nenhum outro PAC poderia solucionar o problema satisfazendo a norma, o mais próximo para solucionar foi  $m=25$ , em que a THD=5.1%.

Tabela 3.16: Ramo 2 - Resultado da localização do APLC e da corrente eficaz, entre parênteses, para soluções de múltiplos cenários.

PAC	$m$ (p.u.)
20	21(0,070);
21	21(0,052);
22	21(0,071);
23	25(0,047);
24	24(0,049);
25	25(0,069);
26	25(0,059);

### Análise da localização e dimensionamento

A partir da localização e dimensionamento é possível verificar a influência que a instalação de APLCs no SEP. Na Figura 3.16 são apresentados os resultados da minimização de THD antes e depois da instalação dos APLCs. Analisando o cenário 7, em que a carga está instalada no PAC 8, sem compensação o nível era de  $THD = 11,855\%$ , com a instalação do APLC em  $m = 7$ , o nível reduziu para  $THD = 5\%$ , uma redução de 58%.

As perdas nas linhas são um grande problema em SEPs e com a instalação dos APLCs, essa foi reduzida consideravelmente. Antes da instalação dos compensadores, no cenário 7, as

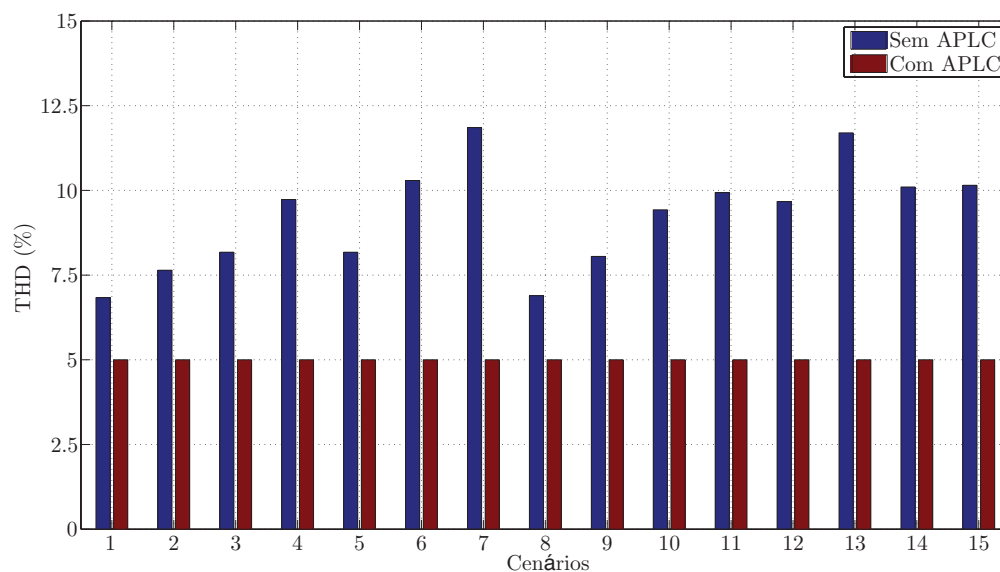


Figura 3.16: Gráfico comparativo do nível de THD antes e depois da compensação.

perdas chegavam a aproximadamente  $HTLL = 5\%$ , depois da instalação, são praticamente nulas. Esse resultado também foi observado para os demais cenários que foram avaliados.

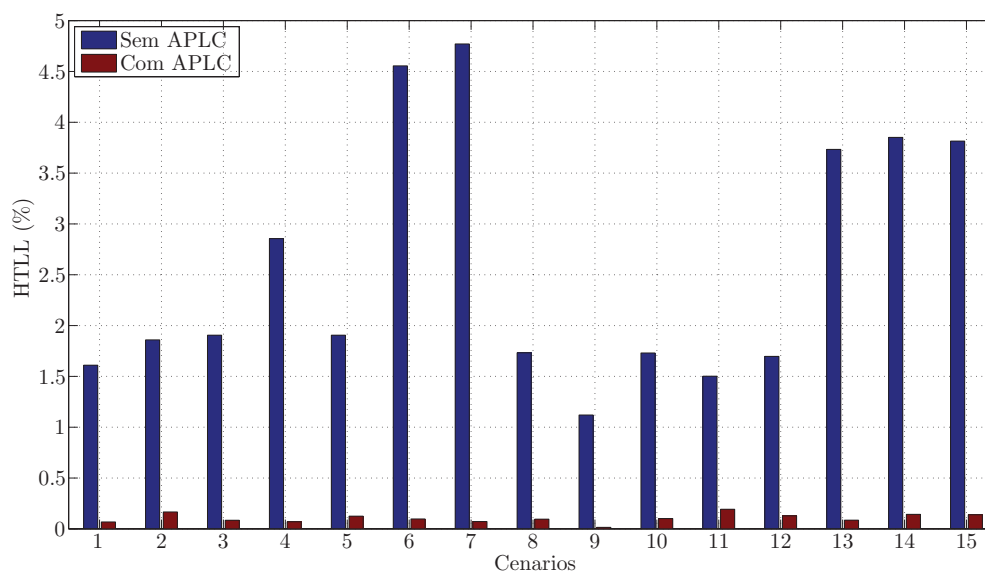


Figura 3.17: Gráfico comparativo do nível de HTLL antes e depois da compensação.

A corrente eficaz da carga não linear utilizada,  $0.1513$  p.u., e as correntes resultantes para cada cenário foram apresentadas nas Tabelas 3.15 e 3.16. Esse somatório dessas correntes deve ser menor que a corrente da carga, este somatório em relação a corrente de referência da carga é apresentado na Figura 3.18. É possível observar a linha acima das barras, que indica a referência de corrente máxima (corrente da carga) estipulada. Em nenhum dos cenários o somatório das correntes dos APLCs ultrapassa essa referência. Além disso, em alguns casos,

a corrente de compensação para satisfazer o nível é de quase 80 %, como é o caso do cenário 9.

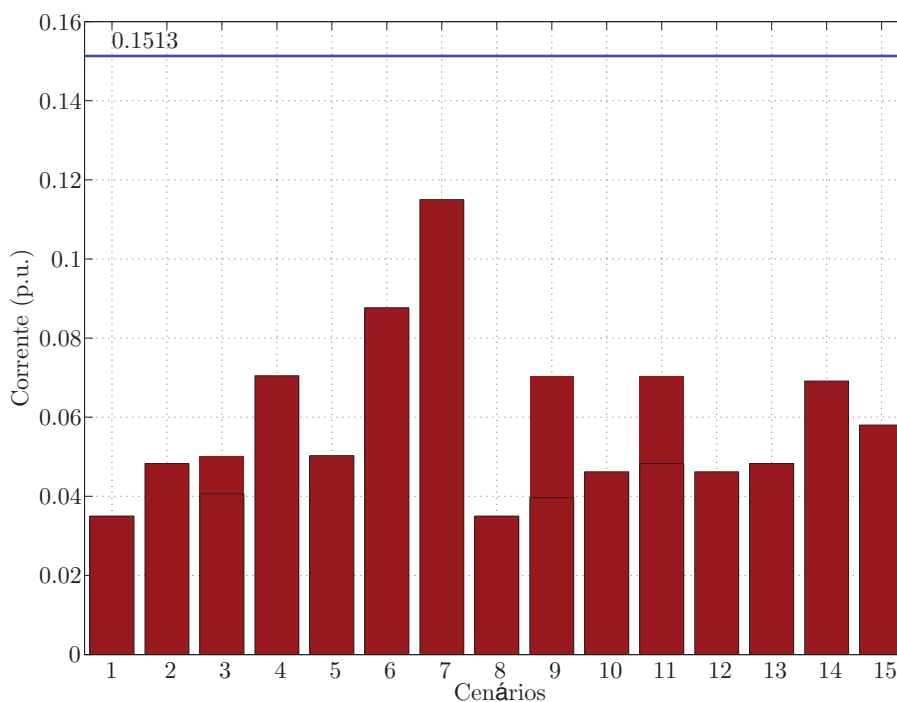


Figura 3.18: Gráfico do nível de IF dos APLCs em comparação com a corrente referência da carga.

A partir dos resultados apresentados, é possível avaliar as potências mínimas necessárias dos APLCs a serem instalados. A potência foi definida pela maior potência apresentada entre todos PACs, nesse sentido a potência mínima para os APLCs instalados deve ser de 115 kVA. Arredondando esse valor para 120 kVA, os APLC devem operar com uma corrente real de 15 A, ou 0.12 p.u..

### 3.4.6 Estudo de caso

Para validar as localizações e o dimensionamento, dois cenários foram testados. Os mesmo cenários foram analisados na literatura, (GRADY et al., 1991; CHANG e GRADY, 1997; KEYPOUR et al., 2004; ZIARI e JALILIAN, 2010). O dados dos cenários antes da instalação dos APLCs são apresentados nas Tabelas 3.17 e 3.18.

No primeiro cenário testado, foram alocadas mais de uma carga e a potência é menor que a utilizada para localização e dimensionamento. Além disso, foram alocadas 3 cargas de 2, 5 MW, em  $k = 7, 24, 25$ , o que equivale ao cenário utilizado (CHANG e GRADY, 1997;



KEYPOUR et al., 2004; ZIARI e JALILIAN, 2010). Na Tabela 3.17, os valores dos índices são descritos.

Tabela 3.17: Cenário teste 1 - Resultados dos índices de qualidade sem APLC

$k$	$mTHD$ %	$aTHD$ %	$mIHD$ %	$HTLL$ %
7, 24, 25	12,8650	9,8785	11,6473	1,8494

O segundo cenário com múltiplas cargas também apresenta cargas com potência de 2,5 MW. As cargas foram alocadas em  $k = 5, 9, 21$ . Os índices para esse cenário antes da instalação do APLC são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18: Cenário teste 2 - Resultados dos índices de qualidade sem APLC

$k$	$mTHD$ %	$aTHD$ %	$mIHD$ %	$HTLL$ %
5, 9, 21	11,8817	7,6374	11,3307	1,6338

O algoritmo de dimensionamento solucionou os dois cenários testes, conforme apresentado na Tabela 3.19.

Tabela 3.19: Cenários teste - Resultado da distribuição de potência dos APLCs.

PAC	$m$ (p.u.)
7,24,25	7(0,108); 24(0,103); 25(0,030);
5,9,21	2(0,115);

Para o cenário teste 1, o algoritmo distribuiu as correntes de compensação nos APLCs alocados nos mesmos PACs em que as cargas foram instaladas, mas com correntes de compensação menores que das cargas. No cenário teste 2, foi necessária a corrente de compensação de somente um APLC, satisfazendo a norma com corrente inferior as correntes da carga.

O resultado da compensação dos APLCs nos cenários testes também foram avaliadas. No cenário teste 1, a redução dos índices de qualidade de energia pode ser visualizada na Tabela 3.20, bem como na Figura 3.19. Observa-se que o nível de THD e IHD satisfazem a norma IEEE-519, enquanto o HTLL foi reduzido a aproximadamente valores nulos.

No cenário teste 2, a minimização dos índices de qualidade pode ser visualizado na Tabela 3.21, bem como na Figura 3.20. A norma também foi satisfeita nesse cenário e

Tabela 3.20: Cenário teste 1 - Resultados dos índices de qualidade com APLC.

$k$	$mTHD$ %	$aTHD$ %	$mIHD$ %	$HTLL$ %
7, 24, 25	5,0000	4,7879	2,2240	0,0700

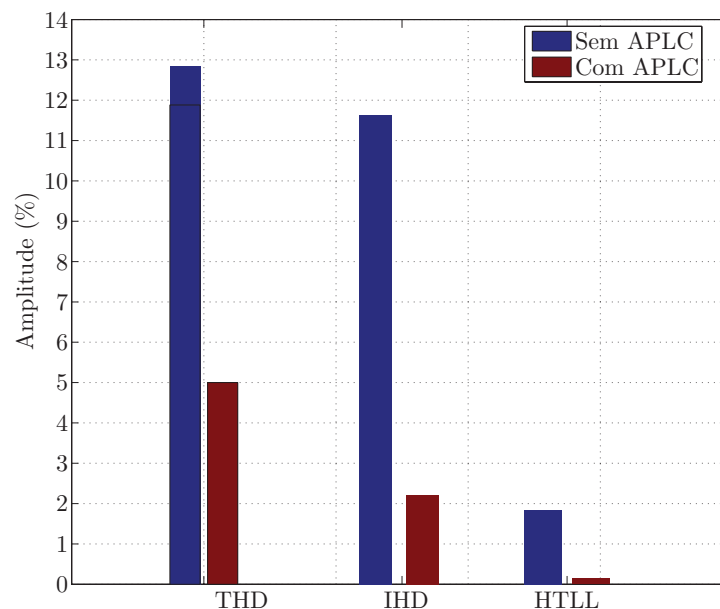


Figura 3.19: Gráfico comparativo dos índices de qualidade de energia antes e depois da compensação dos APLCs.

as restrições de localização e dimensionamento foram obedecidas, o que comprova que o algoritmo de localização e dimensionamento soluciona o problema formulado.

Tabela 3.21: Cenário teste 2 - Resultados dos índices de qualidade com APLC

$k$	$mTHD$ %	$aTHD$ %	$mIHD$ %	$HTLL$ %
5, 9, 21	5,000	3,8590	2,9987	0,1426

### 3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os algoritmos para localização e dimensionamento ótimo de APLCs em um SEP. A área de localização é muito vasta e vem ganhando grande destaque para estudo, devido ao aumento de cargas não lineares no sistema, assim como de normas regulamentadoras para níveis de distorções harmônicas de tensão. Com a implantação de normas, a instalação de APLCs torna-se necessária por parte das concessionárias, que não somente devem satisfazer o nível de tensão, bem como restringir o nível

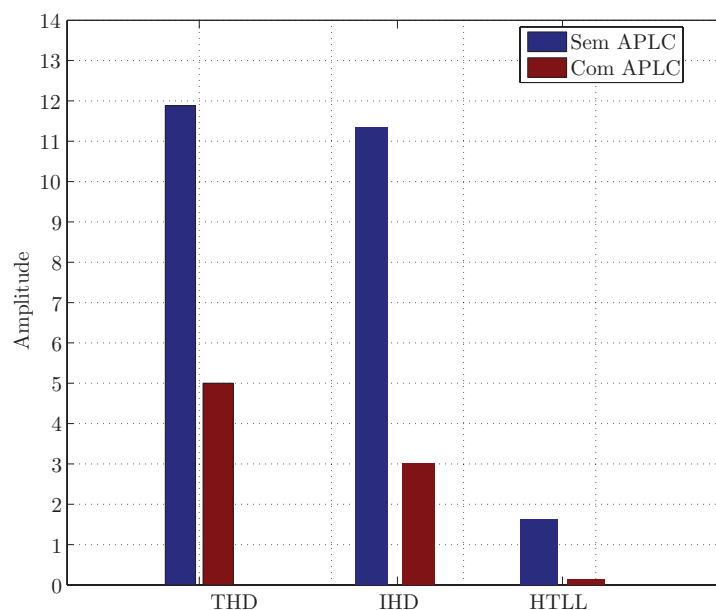


Figura 3.20: Gráfico comparativo dos índices de qualidade de energia antes e depois da compensação dos APLCs.

de harmônicos da tensão fornecida ao consumidor.

Nos estudos da literatura, considera-se que o melhor ponto de conexão do APLC na distribuição radial com único gerador é no fim da primeira linha no alimentador, entretanto, uma rede de distribuição com muitos ramos a localização depende de resultados e análises do SEP, o que permite selecionar o melhor ponto. A partir do estudo para instalação de APLCs, avaliando múltiplos cenários foi possível perceber a necessidade de mais estudos voltados a esse ramo, visto que, as soluções individuais apresentadas na literatura não são aplicadas a cenários realísticos. As soluções de cenários individuais, ou remetem a mudança dos compensadores com a mudança da carga, ou instalam APLCs em praticamente todos os PACs do SEP. Enquanto, a solução de múltiplos cenários apresentada, instalou APLCs em pontos estratégicos de forma que todos os cenários de variação de carga no tempo fossem solucionados.

Observou-se pelos resultados de múltiplos cenários, que qualquer combinação de carga que o SEP apresente, as localizações encontradas devem reduzir as distorções harmônicas. Para todos algoritmos avaliados, também foi possível verificar que o ponto ótimo de instalação do APLC não é o mesmo PAC em que as cargas estão instaladas. Salientado que, quando o APLC é instalado no PAC da carga a redução dos harmônicos pode ser maior. Porém o algoritmo proposto objetiva somente atender a norma IEEE-519, avaliando a me-

lhor relação de menor esforço com maior redução harmônica. Para 16 PACs, a solução de múltiplos APLCs alocou apenas 4 unidades, o que representa 8 a menos que a soluções convencional com cenários avaliados de forma isolada.

O problema de localização e dimensionamento não é um problema com um mínimo global, o qual apresenta várias soluções, pois o objetivo é alocar APLCs com mínima corrente de compensação. Quando não existe local mínimo na  $OF$ , métodos tradicionais podem apresentar resultados mais precisos. Além disso, a precisão também é alta quando o problema não tem restrições. No entanto, o problema de localização de APLCs é não linear, resultando em simplificações das equações para solução com método tradicional, além de possuir mínimos locais e possui restrições de corrente. Portanto, as soluções heurísticas são vantajosas em relação a esse problema. Os métodos heurísticos foram selecionados para comparar com o tradicional foram o PSO, GA e o ABC. As soluções heurísticas não precisam de aproximações da corrente. Pelos resultados obtidos, o ABC apresentou resultados mais satisfatórios que o GA e o PSO. Conclusão avaliada pela menor corrente de compensação apresentada ( $IF = 0,0074$ ). Em termos de complexidade computacional, o ABC é menos complexo e precisa de menos modificações para adequar o problema formulado, resultando em uma solução 5 vezes mais rápida que os demais algoritmos heurísticos. Ademais, todos os algoritmos heurísticos apresentaram boa capacidade de solucionar restrições em relação a corrente máxima, mínima e quantizada.

Com a localização e dimensionamento definidos, o controle deve ser implementado, visto que esses devem operar de acordo com a variação da carga. Dessa forma, no próximo capítulo é proposto um controle que opere para restringir os índices de qualidade de energia e que apresente robustez frente a elementos da rede, que não são explorados na localização. Além disso, o APLC, que nesse capítulo foi tratado com fonte de corrente, será estudado como um conversor.

# 4

## Controle dos APLCs

Os PACs de instalação foram determinados a partir da resolução do problema de otimização tratado no capítulo anterior. Entretanto, sempre que houver variações de carga poder ser necessário variar a potência de compensação proporcionada pelos APLCs. Este capítulo trata do controle em tempo real desses compensadores, objetivando garantir em todas as situações de carga que os índices de qualidade de energia sejam respeitados.

Como mencionado anteriormente, em (AKAGI, 1997) pelo estudo da estabilidade do controle de APLC em SEP, o autor concluiu que a representação, para o circuito estudado, dos compensadores operando como fonte de corrente com referência pela detecção tensão são os mais estáveis, Figura 4.1. Esta representação foi utilizada no estudo de localização, portanto a estabilidade do controle da corrente por detecção de tensão para os PACs que a localização apontou como pontos ótimos é avaliada para o SEP estudado. Como no SEP são instalados dois APLCs, em seguida, a estabilidade e o controle cooperativo de múltiplos APLCs são estudados.

Contudo, para cada mudança do sistema, um valor de diferente de resistência equivalente é necessário para que a corrente injetada seja ótima e os valores de THD permaneçam abaixo dos valores regulamentados. Logo, esse valor deve ser alterado por um controlador, que mede continuamente os harmônicos da tensão da rede, a partir dos quais regula o valor do ganho, conforme Figura 4.2.

O diagrama da Figura 4.2 apresenta o controle considerando um APLC, porém quando

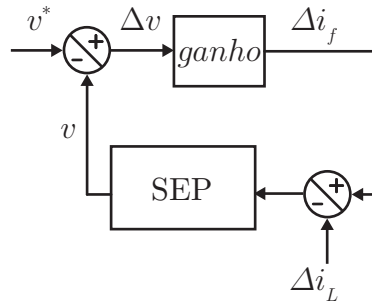


Figura 4.1: Diagrama de blocos simplificado da obtenção da corrente de referência do APLC com controle de ganho.

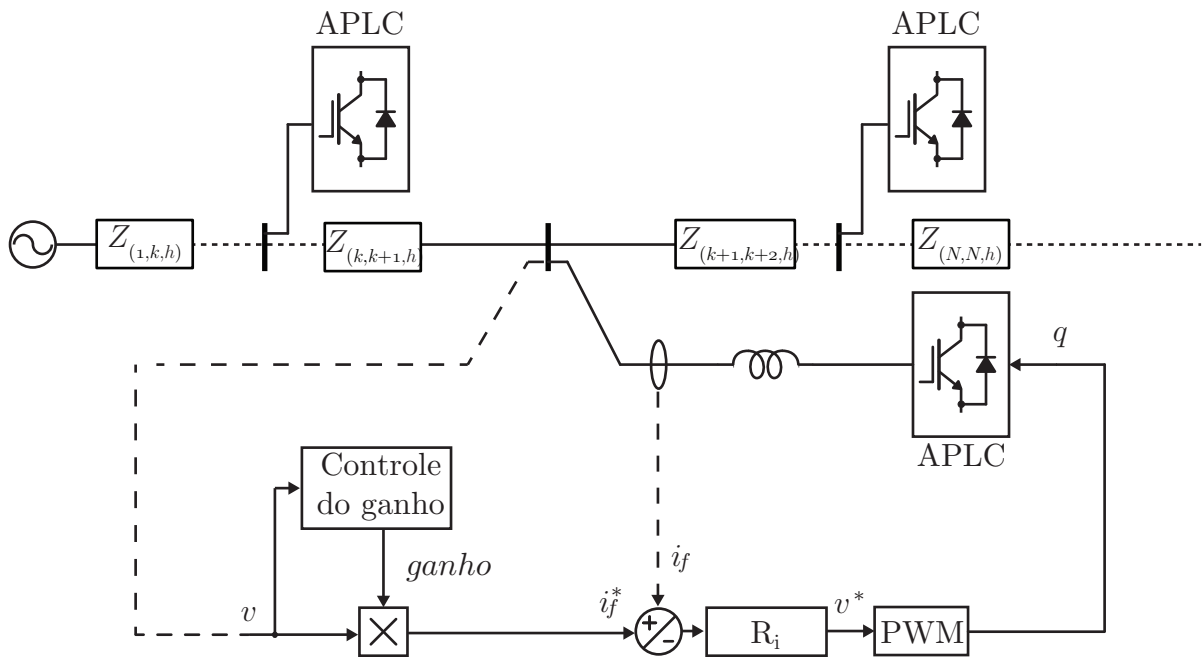


Figura 4.2: Circuito do SEP e diagrama de blocos dos controles cooperativos com ajuste de ganho.

um ou mais APLCs são conectados na rede, além de minimizar os harmônicos de tensão, esses devem operar cooperativamente, o que enseja mais um problema no controle.

Neste capítulo, a estabilidade dos compensadores nos PACs alocados é analisada, e em seguida, a partir de em uma breve revisão bibliográfica, são estudados controladores para APLCs instalados em SEPs, com o objetivo de analisar tanto a regulação do valor do ganho para reduzir a distorção harmônica como a operação cooperativa.

## 4.1 Análise da estabilidade

É essencial discutir como a estabilidade do APLC é afetada pela estratégia de controle e seu ponto de instalação, (AKAGI, 1997). Desse modo, primeiro será analisada a estabilidade de um APLC e em seguida para múltiplos APLCs.

Considerando um APLC, o circuito equivalente da corrente e tensão harmônica, no qual o APLC está instalado é representado pela Figura 4.3. Os harmônicos são injetados pelas cargas não lineares e o APLC é representado por uma fonte de corrente controlada, Figura 2.4(c).

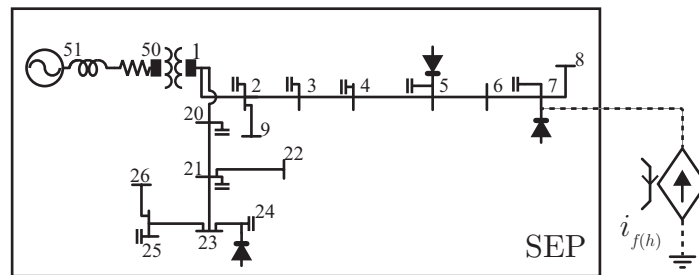


Figura 4.3: Circuito equivalente da influência da corrente de compensação na tensão do PAC.

A estratégia de controle utilizada é a de detecção de tensão, que opera como um resistor na relação entre tensão e corrente de compensação, (AKAGI, 1997; JINTAKOSONWIT et al., 2001). Como o controle opera para controlar harmônicos, é impossível negligenciar o atraso causado pela detecção dos harmônicos. Assumindo que o efeito do atraso pode ser representado por um sistema de primeira ordem, a relação passa a ser de um  $RL$ , e as constantes do circuito são:

$$R_f = 1/K_v; \text{ e } L_f = T_a/K_v. \quad (4.1)$$

A análise da estabilidade do APLC dada para o PAC em que está instalado resulta em um diagrama de blocos de malha fechada conforme Figura 4.4. O diagrama é avaliado para cada harmônico, portanto, as variáveis do tempo, como  $i_f$  e  $v$ , são representadas pelas variáveis na frequência  $I_{(h)}$  e  $V_{(h)}$ .

O bloco  $G_{(h)}$  representa o modelo dinâmico do SEP visto do PAC que o APLC e é expresso por:

$$G_{(h)} = \frac{V_{(h)}}{I_{(h)}}. \quad (4.2)$$

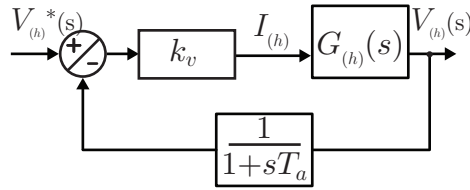


Figura 4.4: Diagrama de blocos do controle por detecção de tensão.

Portanto, a estabilidade de cada PAC em relação a corrente de compensação é descrita pela função de transferência:

$$V_{(h)}^* - V_{(h)} = \frac{G_{(h)}(1 + sT_a)}{(1 + sT_a) + k_v G_{(h)}} I_{(h)}. \quad (4.3)$$

Substituindo  $k_v$  por um controlador  $G_c$  e completando a representação do problema com a corrente da carga não linear como distúrbio, o diagrama pode ser redesenhado, obtendo-se o diagrama completo para um APLC:

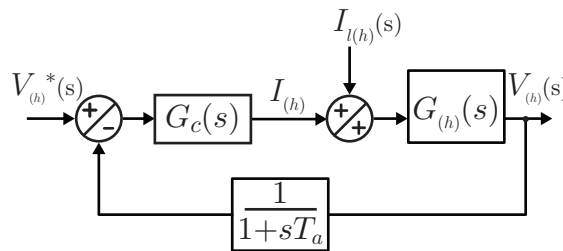


Figura 4.5: Diagrama de blocos do controle por detecção de tensão.

### 4.1.1 Modelo dinâmico

Determinado o diagrama de controle, o modelo dinâmico deve ser definido. Para cada frequência harmônica, os sinais de entrada e saída são representados pela corrente do APLC,  $I_{(h)}$ , e pela tensão no PAC,  $V_{(k)}$ , respectivamente. Nesse sentido, o modelo dinâmico do SEP é representado por uma função de transferência, que representa a impedância equivalente do PAC com APLC instalado.

O modelo utilizado da matriz impedância para a localização, não pode ser utilizada diretamente, pois não representa as equações diferenciais do sistema, para a análise de comportamento do sistema. Considerando que o sistema é complexo, e apresenta vários segmentos de linha, isso resultaria em um modelo de ordem elevada, igual ao número de PACs do SEP. Para simplificar a análise e sabendo que o SEP é representando por segmentos de



linha  $\pi$ , primeiramente a representação considera um segmento, ilustrado na Figura 4.6, cuja impedância é representada pela análise série e paralelo dos componentes passivos, expressa pelas Equações (4.4) a (4.6).

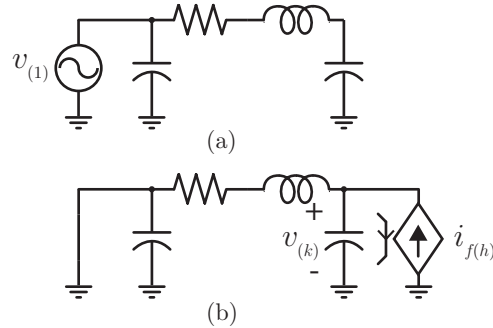


Figura 4.6: Circuito simplificado do modelo da planta, considerando a) a tensão fundamental, b) a fonte de corrente harmônica.

Considerando, que  $R$  e  $L$  estão em série e em paralelo com  $C$ , a admitância é expressa por:

$$Y = \frac{1}{sL + R} + sC = \frac{s^2LC + sRC + 1}{sL + R}. \quad (4.4)$$

Como a planta é dada por,

$$V_{(k)} = I_{(m)}Z_{(k,m)}, \quad (4.5)$$

e sabendo que  $Z = Y^{-1}$ , a planta é representada pela Equação (4.6).

$$G(s) = \left( \frac{sL + R}{s^2LC + sRC + 1} \right). \quad (4.6)$$

Nota-se que considerando um segmento de linha o sistema mínimo é determinado, ou seja, o SEP pode ser representado por dois pólos e um zero. Entretanto, o SEP não é formado por um segmento, mas pela combinação de vários segmentos, nesse sentido, os valores da função de transferência podem ser identificados, sendo a modelagem dada pelo sistema mínimo aproximado, o qual representará a combinação série e paralelo de todos os segmentos vista do PAC em que o APLC está instalado.

A função de transferência pode ser obtida em tempo contínuo, considerando a Equação (4.7):

$$\frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2y = b_0 \frac{du}{dt} + b_1u, \quad (4.7)$$

que pode ser reescrita como

$$A(p)y(t) = B(p)u(t), \quad (4.8)$$

onde  $A(p)$  e  $B(p)$  são polinômios e o operador diferencial é  $p = d/dt$ . Na maioria dos casos não se pode calcular  $p^n y(t)$  porque isso resultará em  $n$  derivadas do sinal. Por isso, o modelo da Equação (4.8) é reescrito por:

$$A(p)y_f(t) = B(p)u_f(t), \quad (4.9)$$

onde

$$y_f(t) = H_f(p)y(t), u_f(t) = H_f(p)u(t), \quad (4.10)$$

em que  $H_f(p)$  é uma função de transferência estável com um ou mais pólos em excesso. Observando-se a Figura 4.7, introduz-se:

$$\theta = [a_2 \ a_1 \ a_0 \ b_1 \ b_0]^T, \quad (4.11)$$

$$\varphi^T(t) = [-p^{n-1}y_f \ \cdots \ -y_f \ p_{m-1}u_f \ \cdots \ u_f], \quad (4.12)$$

$$= [-p^{n-1}H_f(p)y \ \cdots \ -H_f(p)y \ p_{m-1}H_f(p)u \ \cdots \ H_f(p)u]. \quad (4.13)$$

Portanto, o modelo expresso pela Equação (4.9) pode ser reescrito por:

$$p^n y_f(t) = p^n H_f(p)y(t) = \varphi^T(t)\theta. \quad (4.14)$$

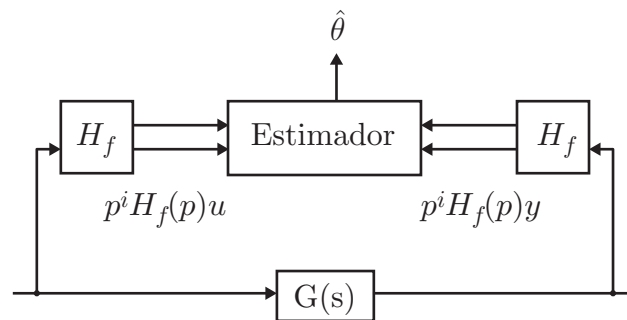


Figura 4.7: Diagrama de blocos do estimador com filtro  $H_f$ , (ASTROM e WIT- TENMARK, 1995).

Considerando o método de mínimos quadrados como estimador para determinar  $\hat{\theta}$ :

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t) \left( y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right), \quad (4.15)$$

onde,

$$P(t) = \left( \int_0^t \varphi^T(\tau)\varphi(\tau)d\tau \right)^{-1}. \quad (4.16)$$

O filtro  $H_f$  pode ser representado por *Basic State Variable Filter*, *Generalized Poisson Moment Function* ou como função de transferência com mesmo número de pólos que a planta identificada.

Para garantir que a função de transferência estimada representa corretamente o PAC estudado, primeiro é analisada a forma de onda e depois,  $(s)$  é substituído por  $(j\omega)$ , cuja impedância resultante deve corresponder ao elemento da mesma posição com mesma frequência da matriz impedância utilizada no estudo de localização.

Determinada a função de transferência do modelo dinâmico, essa deve representar a impedância do sistema de forma correta, visto que será utilizada para avaliar a estabilidade do modelo. Com o modelo dinâmico e a Equação (4.3) da malha fechada, a estabilidade pode ser estudada por métodos como, o método do lugar das raízes, o critério de estabilidade de *Nyquist* e o critério de Estabilidade de *Routh*.

#### 4.1.2 Análise da robustez

O projeto de sistemas de controle demanda modelamento altamente preciso, entretanto, a planta do estudo proposta representa o SEP, que apresenta variações dinâmicas dos elementos, assim como das impedâncias, (DOYLE et al., 1990). No caso de modelos com incertezas, a solução requer, além de um sistema estável em condição nominal, um sistema robusto, que suporte as variações do SEP.

O modelo de um processo é sempre inexato em relação ao sistema físico real devido a: mudanças de parâmetros; dinâmica não modelada; atrasados não incluídos no modelo; mudanças de pontos de operação; ruídos no sensor; perturbações imprevisíveis. O objetivo do projeto de sistemas de controle robustos é garantir o desempenho do sistema a respeito da presença de incertezas consideráveis sobre o processo a controlar.

A robustez é uma característica desejável de sistemas de controle por pelo menos duas razões: o sistema deve operar satisfatoriamente, ainda que em condições de operação distintas daquelas consideradas no modelo do projeto (nominal); as condições de robustez podem ser utilizadas com o objetivo de se adotar um modelo de projeto intencionalmente simplificado, não só para facilitar a sua análise, como também por seu impacto sobre a complexidade do controlador resultante.

Assim, um sistema de controle que é robusto pode ser descrito quando: apresentar baixa sensibilidade; for estável sobre uma faixa de variação de parâmetros; atender as especificações na presença de uma conjunto de mudanças de parâmetros.

A função de sensibilidade é dada por:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G(s)G_c(s)}. \tag{4.17}$$

Como  $S(s) + T(s) = 1$ , em que  $T$ :

$$T(s) = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}, \tag{4.18}$$

e idealmente,  $T(s)=1$ ,  $S(s)$  deve ser muito pequeno. Para sistemas fisicamente realizáveis,  $G(s)G_c(s) \rightarrow 0$  para  $\omega \rightarrow \infty$ , ou seja,  $S(j\omega) \rightarrow 1$ .

A robustez também pode ser avaliada frente a distúrbios aditivos,  $A(j\omega)$ , em que deve satisfazer a inequação dada pela Equação (4.19), e multiplicativo,  $M(j\omega)$ , satisfazendo Equação (4.20).

$$|A(j\omega)| = |1 + G(j\omega)| \tag{4.19}$$

$$|M(j\omega)| = \left| 1 + \frac{1}{G(j\omega)} \right| \tag{4.20}$$

### 4.1.3 Múltiplos APLCs

Agora, considerando dois APLCs, a Figura 4.3, pode ser redesenhada considerando o acoplamento entre os compensadores. Portanto, o diagrama de controle pode ser completado, conforme a Figura 4.9, em que a planta de um PAC influencia no outro.

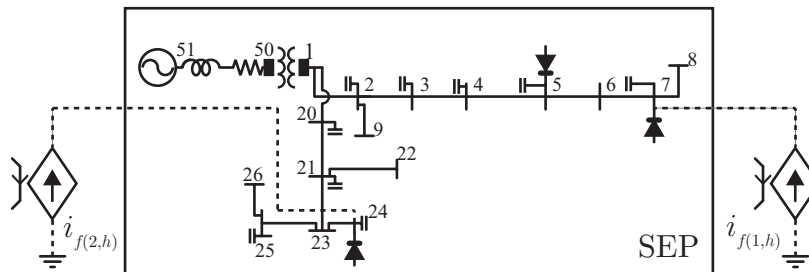


Figura 4.8: Circuito equivalente de controle considerando a influência entre dois APLCs.

Neste sentido, fica claro que o controle de um APLC depende da diagonal principal (impedância equivalente do PAC em que o APLC está instalado) somada às impedâncias da

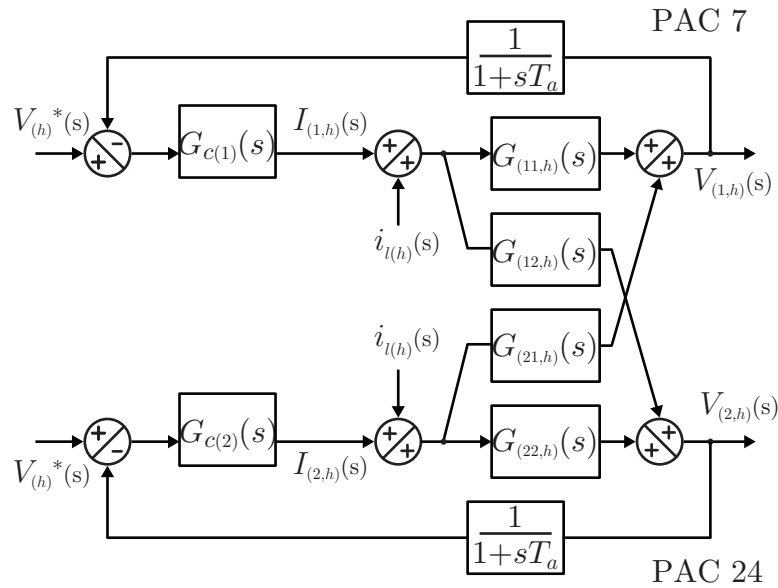


Figura 4.9: Diagrama de controle considerando a influência entre dois APLCs.

diagonal secundária (impedância equivalente entre os PACs com APLC). Assim, a função de transferência em malha aberta é:

$$V_{(1,h)} = G_{(11,h)}I_{(1,h)} + G_{(21,h)}I_{(2,h)}, \quad (4.21)$$

e a análise de estabilidade para dois APLCs é dada por:

$$V_{(1,h)}^* - V_{(1,h)} = \frac{G_{(11,h)}(1 + sT_a)}{(1 + sT_a) + k_v(G_{(11,h)} + G_{(21,h)})} I_{(1,h)} + \frac{G_{(21,h)}(1 + sT_a)}{(1 + sT_a) + k_v(G_{(11,h)} + G_{(21,h)})} I_{(2,h)}. \quad (4.22)$$

Aplicando o mesmo raciocínio de  $v_{(1,h)}$  obtém-se  $v_{(2,h)}$  em malha fechada:

$$V_{(2,h)}^* - V_{(2,h)} = \frac{G_{(22,h)}(1 + sT_a)}{(1 + sT_a) + k_v(G_{(22,h)} + G_{(12,h)})} I_{(2,h)} + \frac{G_{(12,h)}(1 + sT_a)}{(1 + sT_a) + k_v(G_{(22,h)} + G_{(12,h)})} I_{(1,h)}. \quad (4.23)$$

O diagrama considerando dois APLCs, Figura 4.9, pode ser analisado baseado em quadripolo, que torna possível a isolação de um circuito inteiro ou de parte dele, substituindo por seus parâmetros característicos, A partir desse obtem-se uma matriz com quatro elementos, formada pela diagonal principal e secundária, sendo as Equações, considerando o diagrama da Figura 4.9, expressas por:

$$\frac{V_{(1)}}{I_{(1)}} = G_{11}; \quad \frac{V_{(2)}}{I_{(2)}} = G_{22}; \quad \frac{V_{(1)}}{I_{(2)}} = G_{12}; \quad \frac{V_{(2)}}{I_{(1)}} = G_{21}; \quad (4.24)$$

De forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{(1)} \\ V_{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{(1)} \\ I_{(2)} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

## 4.2 Operação cooperativa

Determinado o diagrama para verificar a estabilidade para um e dois APLCs, o bloco do controlador  $G_c$  é estudado. Dessa forma, uma pequena revisão sobre controle cooperativo é apresentada, a partir da qual é proposto um novo controle.

Com base no estudo de estabilidade, (AKAGI, 1997), em (JINTAKOSONWIT et al., 2001) foi implementado um APLC com ajuste automático do ganho e em (JINTAKOSONWIT et al., 2002; JINTAKOSONWIT et al., 2003), o trabalho foi complementado com controle cooperativo. Os autores implementaram dois APLCs paralelos com detecção de tensão e ajuste automático de ganho do controlador. Considerando um compensador, o ganho,  $k_v$ , é ajustado baseado nos valores de nível de THD no ponto em que os APLCs estão instalados, permitindo que a corrente de referência do APLC,  $i_f^*$ , varie de acordo com as variações dos harmônicos de tensão do PAC,  $V_{(h)}$ , sendo  $h = 7$ . O valor do ganho é limitado e varia entre 0 e 1, como depende da variação da THD, se o erro da THD for negativo aumenta o  $k_v$  e se o erro for positivo, diminui o  $k_v$ . Entretanto, o autor salienta que em casos de falta no sistema, o sistema é rearranjado de forma que todos os pontos continuem operando. Em alguns casos, essa mudança resulta em dois APLCs operando no mesmo ponto ou em PACs muito próximos. Como os níveis de THD são diferentes para cada ponto de operação antes da falta, e quando a falta ocorre, o nível de distorção é muito semelhante, isso resulta que um APLC opere de forma a reduzir a THD e o outro tenda a zero, (JINTAKOSONWIT et al., 2002). Para evitar esse efeito foi proposto pelo autor que o ganho  $k_v$  dependa do nível de THD e dos valores das correntes de compensação de ambos os APLCs. Nesse sentido, implementou uma comunicação entre os compensadores, garantindo um controle cooperativo. A partir dessa comunicação, considerando que o compensador 1 tem um ganho  $k_{v1}$  e o compensador 2 ganho  $k_{v2}$ , se a corrente do compensador 1 está maior que a do compensador 2, diminui-se o  $k_{v1}$ , e aumenta-se  $k_{v2}$  e vice-versa. Esse processo é repetido até as correntes estarem iguais.

Percebe-se que primeiro o autor utilizou um método que altera o valor do ganho fre-

quentemente, mudando o ganho  $k_v$  de acordo com o valor da THD de tensão. Devido a isso, quando se considerou dois APLCs foi necessário a utilização de uma comunicação entre eles, com transmissão dos dados dos valores de corrente, para que esses operassem com a mesma potência. Esse controle é intuitivo e satisfaz o limite de THD da norma IEEE-519. Do ponto de vista de controle é um controle simples, mas esse pode oscilar quando os valores de corrente não forem idênticos, visto que o autor não definiu nenhuma banda de histerese. Além disso, é necessária a comunicação entre os compensadores, o que prejudica a confiabilidade do controle, visto que essa pode apresentar problemas, e a que complexidade da regulação do  $k_v$  aumenta quando mais de dois compensadores são instalados.

Para contornar o problema da comunicação, em (CHENG e LEE, 2006), um controle cooperativo de APLCs para redução de harmônicos de tensão foi proposto sem nenhuma comunicação. Os ganhos do controle da corrente de compensação são baseados na operação de decaimento (método utilizado para controle de geradores em sistemas de potência, (BERGEN, 1989)), que garante a estabilidade do sistema e a cooperação entre as unidades. Apesar do controle ser individual para cada APLC, a forma de cálculo dos ganhos dos controladores relaciona a condutância e a potência do compensador, por uma relação de decaimento, resultando em um ganho  $G_c$ , que permite operação cooperativa dos todos APLCs instalados. A distribuição da potência sem comunicação pode ser melhor interpretada analisando o controle de *droop*, ou controle de decaimento, que é descrito no Apêndice B.

Neste estudo de (CHENG e LEE, 2006), nenhuma restrição de índice de qualidade de energia foi imposto, por isso em (LEE e CHENG, 2007), o trabalho foi complementado com regulação do nível de THD. Para manter a THD, varia-se a referência de potência aparente do APLC, a partir dos valores de distorção. Neste controle, não tem limites para o valor do ganho, assim cada APLC injeta o máximo de potência possível no PAC em que está instalado para regular a THD ao valor de referência, ou seja, quando a THD está abaixo da referência opera como uma carga não linear.

Em (LEE et al., 2009), o controle distribuído foi discretizado e aplicado em um SEP, assim somente harmônicos selecionados são compensados. Diferente de (LEE e CHENG, 2007), que considerou o ajuste a partir do valor de THD para ajuste do ganho (minimização igual para todos os harmônicos), em (LEE et al., 2009) foi considerado o parâmetro de IHD, em que cada harmônico vai ser compensado com um fator de compensação diferente.

Neste caso,  $V_{(h)}$  representa a tensão no harmônico de ordem  $h$ , em que considerou somente  $h = [5, 7]$ . Como somente dois harmônicos foram considerados, não foi imposto referência de THD. Nota-se que se o SEP apresentar mais de dois harmônicos, o nível de THD não será satisfeito.

Com o estudo do estado da arte, percebe-se que o controle cooperativo vem ganhando espaço, devido ao aumento de harmônicos e novas regulamentações, atendendo as novas necessidades dos consumidores (equipamentos eletrônicos) e concessionárias (energia com qualidade, estabilidade e confiabilidade, utilizando de compensadores baseados em eletrônica de potência). Os controles estudados apresentam a minimização de THD ou de IHD, entretanto, nenhum satisfazer os dois índices de qualidade de energia da norma IEEE-519. Além disso, o controle de (JINTAKOSONWIT et al., 2002) precisa de comunicação e pode apresentar oscilações quando as corrente dos APLCs não são idênticas e os controles propostos por (CHENG e LEE, 2006; LEE e CHENG, 2007; LEE et al., 2009) quando o erro de THD está abaixo da referência, o controlador tenta compensar o erro injetando mais harmônicos no SEP, como se fosse uma carga não linear e dessa forma não operando de forma ótima.

Nesse sentido, é proposta a implementação de um controle cooperativo sem comunicação entre os APLCs para reduzir harmônicos, que opere com as duas referências da norma IEEE-519, THD e IHD. Além disso, limites para o ganho são impostos, garantindo que o APLC não opera como carga não linear.

#### 4.2.1 Controle proposto

O controle implementado é baseado em método de controle por corrente (*Current Control Method*) (CCM) com ajuste de ganho explicado a seguir, (GEHRKE et al., 2012a; GEHRKE et al., 2014). Para a detecção de harmônicos foi implementado uma transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*) (DFT). As referências de distorção harmônica são  $THD < 5\%$  e  $IHD < 3\%$ , entretanto, essas podem mudar no caso de vários APLCs. O controle proposto é ilustrado no diagrama de blocos da Figura 4.10, em que o controlador calcula a referência de corrente harmônica, resultando em uma variação de tensão pela impedância do sistema. Essa variação é o sinal de realimentação do controlador. Nota-se que os valores foram considerados normalizados e que IHD e THD são as referências de



distorção harmônica dadas pela norma.

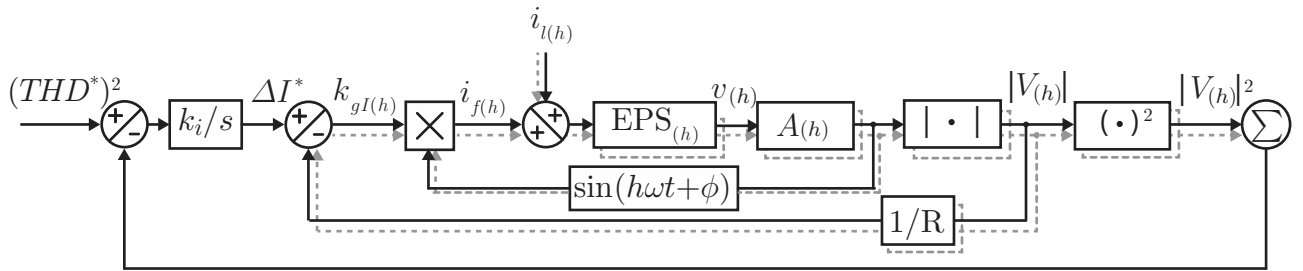


Figura 4.10: Diagrama de blocos de controle para cálculo da referência da corrente do compensador, em que  $\phi = \arctan \left( \frac{V_{(h)}^{Im}}{V_{(h)}^{Re}} \right)$ .

Na Figura 4.11 é ilustrado o diagrama de controle de um APLC conectado ao SEP, que apresenta vários APLCs.

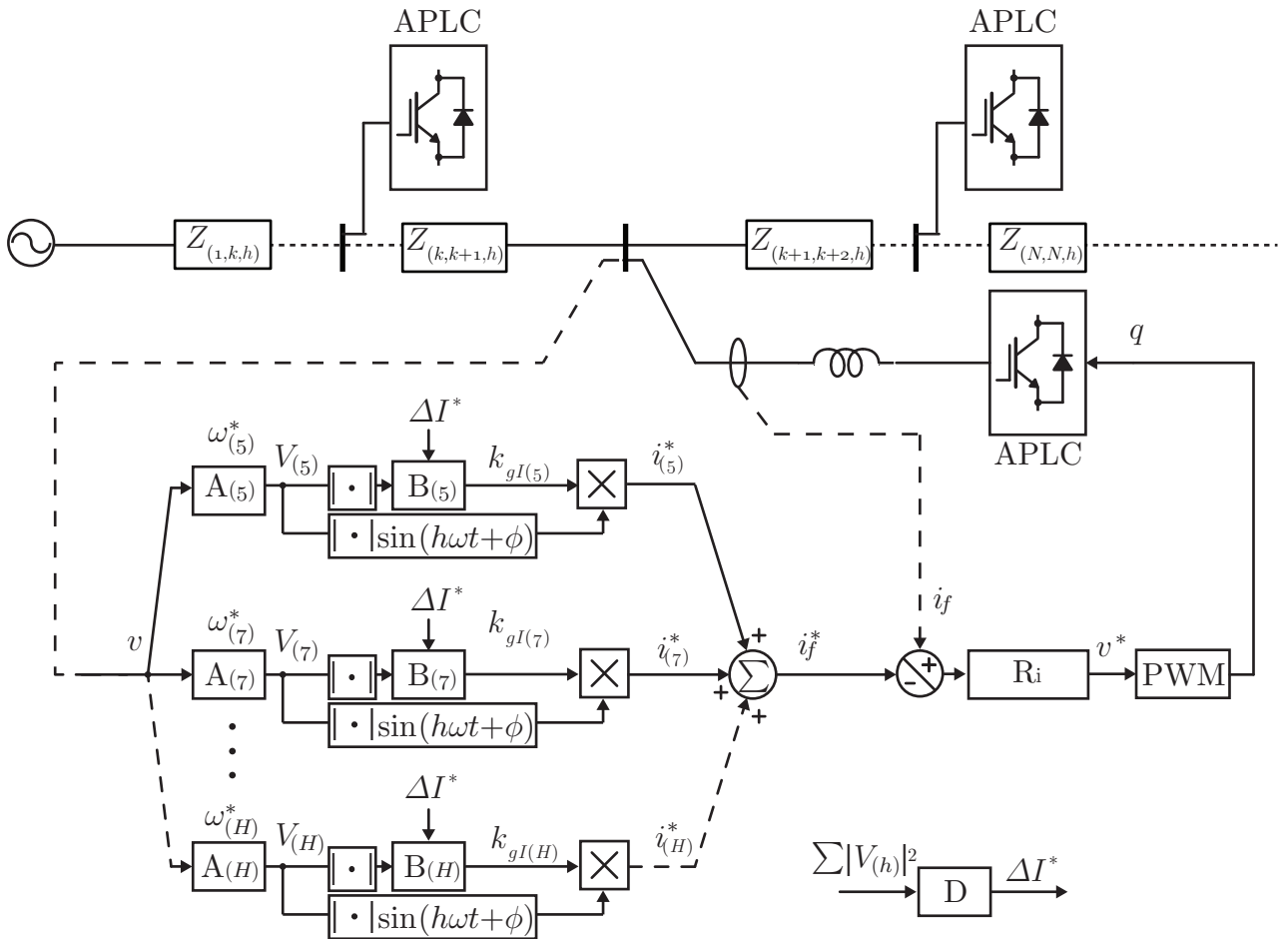


Figura 4.11: Controle da corrente harmônica, , em que  $\phi = \arctan \left( \frac{V_{(h)}^{Im}}{V_{(h)}^{Re}} \right)$

No bloco A foi implementado um isolador de frequências baseado na DFT, em que a tensão aquisitada no tempo é decomposta em função da frequência. No bloco B é calculada

a corrente de compensação do PAC, a qual depende das referências de operação do APLC. A saída de cada bloco B é somada e transformada para o tempo, gerando uma corrente de referência,  $i_f^*$ . Essas correntes são comparadas com a corrente de compensação,  $i_f$ , do APLC para que a malha de controle  $R_i$  seja fechada.

### Controle e sinais de referência

O controle adquire a tensão  $V$  e as decompõem no bloco A, sendo a saída as tensões harmônicas no domínio da frequência,  $V_{(h)}$ , em que os harmônicos são selecionados são dados pelo vetor  $h = 2, \dots, H$ . A variável  $V_{(h)}$  é a entrada dos blocos B, que calculam os fatores de minimização harmônica,  $k_{gI(h)}$ . A soma das tensões  $V_{(h)}$  ao quadrado são utilizadas para calcular a THD no bloco D, e a partir da referência de THD é calculado o fator de deslocamento  $\Delta I^*$ . O fator  $\Delta I^*$  desloca a reta de decaimento do bloco B. As saídas do bloco B,  $k_{gI(h)}$ , são multiplicadas pelas tensões harmônicas, resultando nas correntes harmônicas de referência no domínio do tempo,  $i_{(h)}^*$ , como expressa a Equação (4.26).

$$i_{(h)}^* = k_{gI(h)} V_{(h)} \sin(h\omega t + \phi). \quad (4.26)$$

As correntes harmônicas,  $i_{(h)}^*$ , são somadas resultando na referência de corrente,  $i_f^*$ :

$$i_f^* = \sum_h^H i_{(h)}^*. \quad (4.27)$$

Como o sistema opera em malha fechada, esta corrente  $i_f^*$  é comparada com a corrente de compensação medida,  $i_f$ , que é a corrente real gerada pela estrutura do APLC. A corrente,  $i_f$ , é regulada por  $R_i$ , obtendo-se a saída  $v_f^*$ , que é a tensão de referência das chaves. Como as chaves operam pelo acionamento dos gatilhos, esse sinal é comparado com uma triangular para gerar o sinal de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation*) (PWM), gerando os pulsos.

### Bloco A - Seleciona harmônicos

Neste bloco a tensão harmônica é decomposta utilizando o método de detecção de harmônicos em tempo real (*Real-Time Harmonic Detection Method*) (RTHDM). Dessa forma, é possível derivar as ordens de harmônicos selecionados. Logo, com os harmônicos

decomposto, é possível sintonizar o controlador para cada frequência aumentando a precisão dos resultados.

O RTHDM é baseado na DFT janelada, embora com menor esforço computacional. Para seleção de harmônicos, tabelas de seno e cosseno são necessárias. A definição de DFT é dada em (4.28), em que  $s_d$  é o sinal de valor discreto no instante  $n$ ,  $N_d$  é o período do sinal discreto,  $i = \sqrt{-1}$  é a unidade complexa,  $X$  é a representação complexa da DFT e  $X_{(h)}$  é a representação na  $h$ -ésima harmônica.

$$X_{(h)} = \sum_{n=0}^{N_d-1} s_{d[n]} \exp\left(\frac{-2i\pi nh}{N_d}\right) \quad (4.28)$$

A determinação contínua de  $X_{(h)}$  para cada nova entrada amostrada requer alto esforço computacional, o que não é desejado para sistemas em tempo real. Uma alternativa é determinar a mudança de  $X_{(h)}$  em resposta as mudanças de  $s_{d(h)}$  e então atualizar  $X_{(h)}$  para a próxima estimação. Desde que  $s_{d(h)}$  e a exponencial complexa são consideradas periódicas com  $N_d$  amostras, também é possível para determinar a representação da DFT usando  $N_d$  amostras, iniciando no instante  $a$  em vez de 0. O deslocamento da tensão é representado por (4.29):

$$X_{[a]}^{(h)} = \sum_{n=0}^{N_d-1} s_{d[n+a]} \exp\left(\frac{-2i\pi h(n+a)}{N_d}\right) \quad (4.29)$$

Se o sinal de  $s_{d[n]}$  é periódico e estável,  $X_{[a]}^{(h)}$  é constante para todo  $a = 0, 1, 2 \dots$ . Se, entretanto, o sinal muda por alguma razão, então a representação da DFT muda também. A diferença pode ser escrita como (4.30), na qual pode ser utilizado para atualizar o valor de  $X_{[a]}^{(h)}$  para cada nova amostra, mas com esforço computacional reduzido, comparado a (4.31).

$$X_{[a+1]}^{(h)} - X_{[a]}^{(h)} = \sum_{n=0}^{N_d-1} s_{d[n+a+1]} \exp\left(\frac{-2i\pi h(n+a+1)}{N_d}\right) \dots \\ \dots - \sum_{n=0}^{N_d-1} s_{d[n+a]} \exp\left(\frac{-2i\pi h(n+a)}{N_d}\right) \quad (4.30)$$

$$X_{[a+1]}^{(h)} - X_{[a]}^{(h)} = (s_{d[a+N_d]} - s_{d[a]}) \exp\left(\frac{-2i\pi ha}{N_d}\right) \quad (4.31)$$

A transformada dada por (4.29) tem como saídas a amplitude e o ângulo do sinal dos  $h$ -ésimos harmônicos no instante  $n = 0$ . Para cada instante  $n \neq 0$ , o ângulo é corrigido. Tais correção podem ser realizadas com a teoria de DFT janelada, dada por (4.32), onde

$s_{d[a,c]}^{(h)}$  contém informação de amplitude e ângulo para  $h$ -ésima harmônica de  $s_{d(h)}$ , utilizando amostras de  $s_{d[a]}$  através de  $s_{d[a+N_d-c]}$ , quando observado em  $n = c$ . Nota-se que se a informação do ângulo é desejada em  $c = a$  ou  $c = a + N_d$ , então a exponencial complexa em (4.31) e (4.32) são os mesmos.

$$X_{[a,c]}^{(h)} = X_{[a]}^{(h)} \exp\left(\frac{-2i\pi hc}{N_d}\right) \quad (4.32)$$

Neste caso, a informação dada por  $X_{(h)}$  para  $h > N_d/2$  é redundante e pode ser descartada, reduzindo o esforço computacional. Além disso, se o APLC requer somente alguns componentes harmônicos, então  $X_{(h)}$  pode ser computado somente para os valores selecionados. Finalmente, o sinal de entrada  $x_h$  pode ser reconstruído pela soma dos componentes harmônicos dado por (4.33).

$$s_d = \frac{1}{N_d} \left( X_{[b,n]}^{(0)} + \sum_{h=1}^{N_d/2} (X_{[b,n]}^{r(h)} + X_{[b,n]}^{i(h)}) \right) \quad (4.33)$$

A componente CC,  $X_{(0)}$ , não apresenta redundância, portanto está fora do somatório.

### Bloco B - Controle do ganho pela referência de IHD

No bloco B são calculados os fatores de minimização harmônicos,  $k_{gI}$ , a partir da referência de IHD. A saída é calculada pelo regulador da Figura 4.12. O controle opera baseado no controle por decaimento que altera o ganho e a referência de IHD pela equação (4.34), permitindo que vários APLCs cooperem de forma que compartilhem cargas sem nenhum tipo de comunicação, o que aumenta a confiabilidade do sistema.

$$\Delta IHD = R\Delta I \quad (4.34)$$

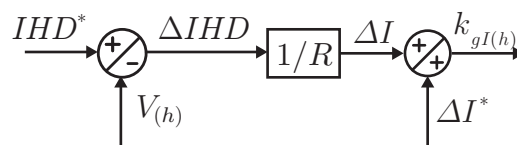


Figura 4.12: Diagrama do controle de IHD.

O valor do coeficiente de decaimento  $1/R$  pode ser calculado de forma similar a calculada no controle de decaimento utilizada no SEP, no qual são utilizados os valores máximos e

mínimo de frequência e potência de operação do gerador, (BERGEN, 1989). Para o controle de decaimento implementado, o valor do coeficiente é dado em função dos valores máximos de IHD e corrente que o APLC pode assumir.

### Bloco D - Controle de redução da referência de IHD baseado na THD

Como foram considerados os harmônicos  $h = 2, \dots, H$ , sendo  $H = 25$ , o controle de THD também é necessário. A referência do fator de deslocamento  $\Delta I^*$  é calculada de acordo com a Figura 4.13. O  $k_{gT}$  é somado a saída do controle de IHD. Assim como no controle de geradores, em que  $\Delta P^*$  desloca a reta de decaimento do controle, o  $\Delta I^*$  é o equivalente no controle de APLCs. O regulador opera somente quando a THD está acima do limite desejado, ou quando  $\Delta I^* > 0$ . O objetivo de operar dessa forma é minimizar a corrente sempre que possível.

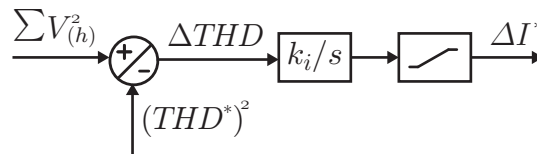


Figura 4.13: Diagrama do controle de THD.

### 4.2.2 Análise do controle

O controle proposto foi baseado no controle de geradores em SEP, apresentando os ganhos de decaimento. Nesta seção, para avaliar o controle aplicado a APLCs, a planta do sistema é modelada e a sensibilidade desse modelamento é estudada.

Tendo conhecimento do diagrama e da planta do controle, é possível apresentar o diagrama de controle com as funções de transferência. Nota-se que a dinâmica de compensação da tensão do SEP depende unicamente da planta do sistema, portanto, o controle de decaimento é representado conforme o diagrama da Figura 4.14. Comparando com o diagrama da Figura 4.5,  $G_c(s)$ , a priori, foi substituído pelo ganho  $1/R$ ,  $G_{(h)}(s)$  por um polinômio com constantes, visto que a planta será identificada posteriormente, e foi acrescentada uma referência  $\Delta I^*$ . Os sinais de entrada e saída são considerados contínuos para a formulação do controle.

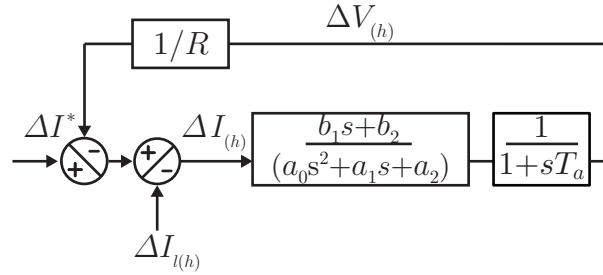


Figura 4.14: Diagrama de controle com as funções de transferência obtidas.

A partir do diagrama com as funções de transferência, a análise do decaimento é estudada, relacionando a corrente da carga com a tensão de saída.

Em malha fechada tem-se,

$$\Delta V_{(h)}(s) = -\Delta I_{l(h)}(s) \left[ \frac{\left( \frac{b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \right)}{1 + \left( \frac{b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \right) \left( \frac{1}{R} \right) \left( \frac{1}{1 + s T_a} \right)} \right], \quad (4.35)$$

e em regime permanente,

$$\Delta V_{(h)} = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta V_{(h)}(s)],$$

$$\Delta V_{(h)} = -\Delta I_{l(h)} \left[ \frac{\left( \frac{b_2}{a_2} \right)}{1 + \left( \frac{b_2}{a_2} \right) \left( \frac{1}{R} \right)} \right] = \frac{-\Delta I_{l(h)}}{\frac{a_2}{b_2} + \frac{1}{R}}. \quad (4.36)$$

Se  $\frac{a_2}{b_2}$  for considerado nulo, a mudança de carga será:

$$\Delta V_{(h)} = -\Delta I_{l(h)} R. \quad (4.37)$$

A característica de adicionar um ganho a malha fechada apresenta a característica do controle de decaimento. O ganho é obtido a partir da reta característica ilustrada na Figura 4.15. Observa-se que diferente do controle de geradores, o controle de distorções harmônicas opera somente com limite máximo de IHD, portanto o ganho deve ser obtido para que os limites sejam satisfeitos.

Definido o ganho de decaimento para um harmônico, o diagrama é completado com a inserção de todos os harmônicos e com o controle suplementar, conforme ilustra a Figura 4.16. Dessa forma, o controlador  $G_c(s)$  é completado com um controle integrador. Nota-se que a referência é definida pelo nível de THD, que é calculado a partir da soma quadrática das IHD. Esse controle integrador garante erro zero em regime permanente. Quando o nível de

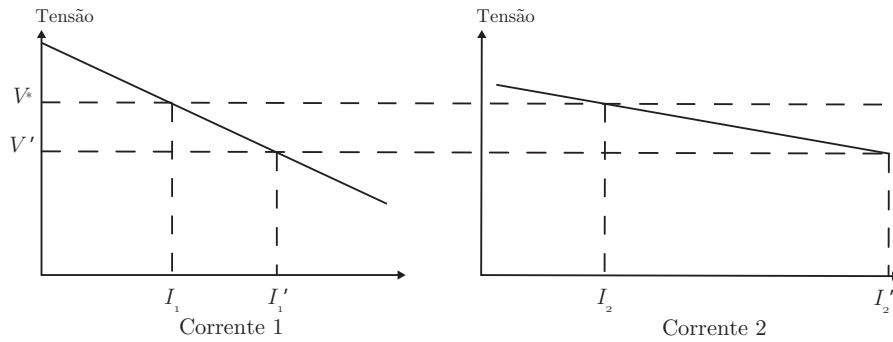


Figura 4.15: Característica de decaimento entre corrente harmônica do APLC e tensão do PAC.

THD estiver acima da referência, o valor de  $\Delta I^*$  é elevado, deslocando a reta de decaimento, como demonstra a Figura 4.17. Esse valor é limitado a valores positivos, de maneira que o controle não afete o nível de IHD negativamente. O limitador também garante corrente mínima, pois só atua quando o nível de THD estiver acima da referência.

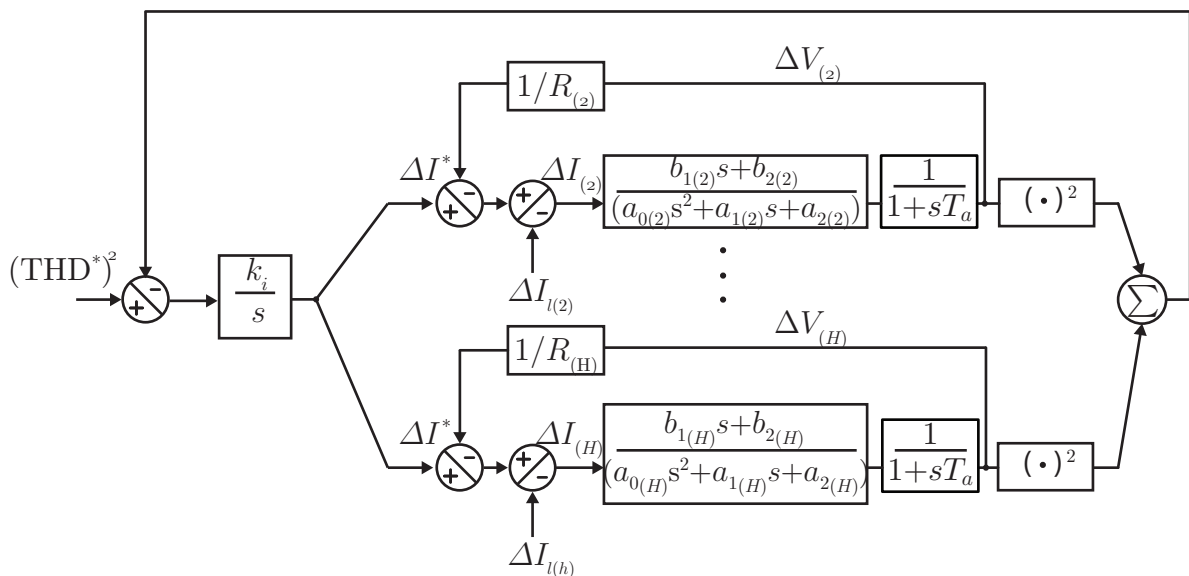


Figura 4.16: Diagrama do controle suplementar.

### 4.3 Coordenação

A estratégia apresentada no sessão 4.2, apresentou resultados de compensação local do APLC, que mostraram que a THD e o nível de tensão são compensados no ponto em que estão instalados. Entretanto, a estratégia não garante que todos os PACs do SEP satisfaçam a norma (IEEE-STD.519, 1993). Para gerenciar diversos APLCs em um SEP de forma cooperativa e ótima (mínima corrente e níveis de tensão e THD de tensão abaixo dos re-

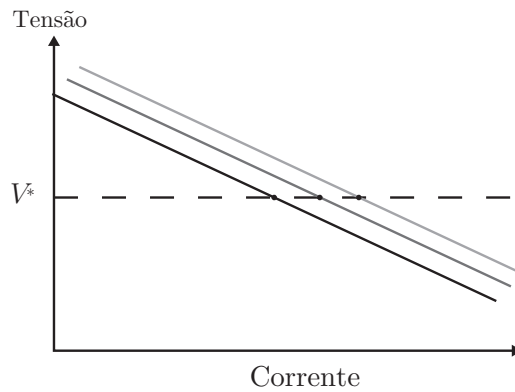


Figura 4.17: Deslocamento da reta de decaimento.

gulamentados pela norma), um sistema de coordenação foi implementado, com estrutura ilustrada na Figura 4.18.

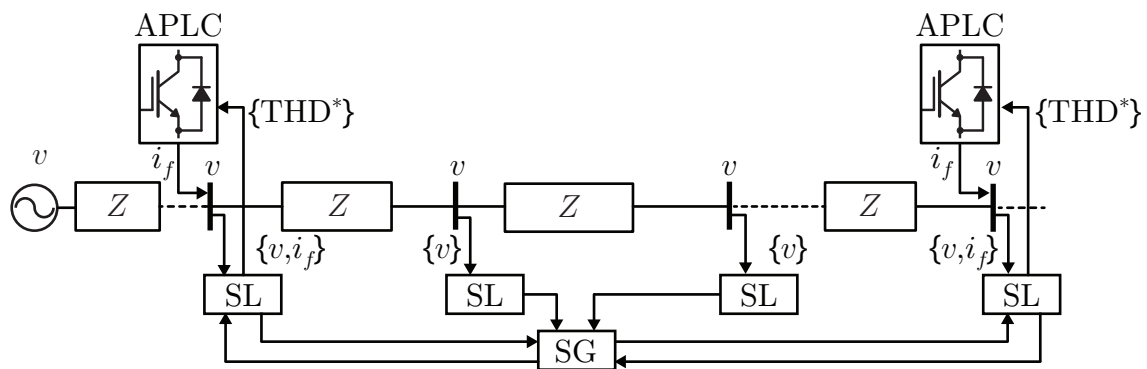


Figura 4.18: Diagrama da coordenação dos APLCs.

Um sistema de coordenação é responsável pela supervisão e controle de uma planta. Eventos ocorridos na planta geram indicações para o supervisor global (SG), que baseado nos dados recebidos, norteia o controle efetivo dos subsistemas. Para que o SG supervise e controle todos os sistemas conectados a ele, esse deve ser de alta confiabilidade e disponibilidade. O objetivo da utilização do SG é alcançar um sistema inteligente, que resulte na automação do sistema distribuído. Ele deve atuar de forma global para melhorar a qualidade de energia e o fornecimento de potência dos subsistemas. Os subsistemas são representados pelos APLCs. Dessa forma, o SG controla as referências de operação de cada APLC, com o objetivo de coordenar as unidades. As informações da capacidade ativa dos APLCs e sobre condições de operação do SEP no tempo são fornecidas por um supervisor local (SL).

A comunicação entre o SL e o SG ocorre somente quando os limites da qualidade de energia não estão adequados ou em intervalos de tempos determinados para manter o sistema



sob supervisão. Os dados recebidos são utilizados para calcular as novas referências de operação, que são enviados para os APLCs correspondentes. Portanto, o supervisor pode ser representado por um autômato, cujas mudanças de estados são ditadas pela ocorrência de eventos na planta do SEP. Como a comunicação entre o SG e os APLCs é assíncrona e muitos SLs podem enviar dados ao mesmo tempo, foi analisada a sensibilidade frente a corrente da carga para definir uma hierarquia entre os PACs.

### 4.3.1 Supervisório local

O SL é responsável por adquirir as tensões  $V_{(k)}$  em tempo real no PAC no qual estão instalados. Com os dados adquiridos, esse supervisiona o ponto em que está instalado relativo aos índices de qualidade de energia. Os índices são regulamentados pela (IEEE-STD.519, 1993). Para calcular os índices, primeiro, o SL decompõe o sinal de tensão adquirido em tensão de harmônicos selecionados utilizando a técnica RTHDM, explicado anteriormente.

Depois que os dados foram adquiridos e decompostos, o SL calcula os índices de qualidade de energia especificados pelas normas, THD e IHD, pelas Equações (2.18), (2.19). Caso os índices estejam acima dos regulamentados pela norma IEEE-519 (THD > 5% e IHD > 3%), o SL envia um pacote de dados para o SG, pois o(s) PAC(s) não está/estão satisfazendo os limites regulamentados. O pacote enviado pelo SL contém a informação dos índices de qualidade de energia e das tensões de cada ponto.

O SL também é capaz de detectar variações desses índices de qualidade de energia:  $\Delta THD = THD_{[n]} - THD_{[n-1]}$ ,  $\Delta IHD = IHD_{[n]} - IHD_{[n-1]}$ , em que  $n$  é o tempo discreto. Essas equações de diferença indicam que houve uma mudança de carga no SEP, e as referências de operação dos APLCs devem ser recalculadas. As referências devem ser recalculadas, pois com a variação da carga, os compensadores não estarão mais operando no ponto ótimo, ou seja, podem estar injetando correntes desnecessariamente.

Além disso, o SL mede as corrente de compensação dos APLCs e as subtrai do sinal de tensão, pela Equação (2.16), por isso as tensões que são enviadas ao SG são sem compensação. Desta forma, o SG realiza os cálculos com base nas tensões sem compensação, o que garante que as referências sejam ótimas.

O SL também é responsável por transmitir as referências de operação para os compensa-

dores. Dessa forma, depois que o SG recalcula as referências e envia as novas referências de operação para o SL, que tem a responsabilidade, portanto, de receber essas novas referências e repassá-las aos APLCs. Nota-se que, dessa forma, os compensadores não precisam ter comunicação, sendo a única alteração necessária, as entradas para as referências de operação. Como os SLs são responsáveis pela aquisição, detecção de limites violados e transmissão das referências, isto facilita o estudo e implementação da operação coordenada.

### 4.3.2 Supervisório Global

O supervisório global controla as referências de operação do APLC. Os dados para cálculo das referências são obtidos por meio do SL, o qual envia os dados obtidos que informam as condições do operação do SEP no tempo. O SG interage com os dados enviados pelos SLs na forma de eventos, os quais são gerados de acordo com os limites estabelecidos pelas normas. Para gerenciar os eventos, o SG funciona de acordo com o autômato ilustrado pela Figura 4.19. Dependendo do evento gerado, o SG vai calcular uma sequência de operações como é descrito nesta seção.

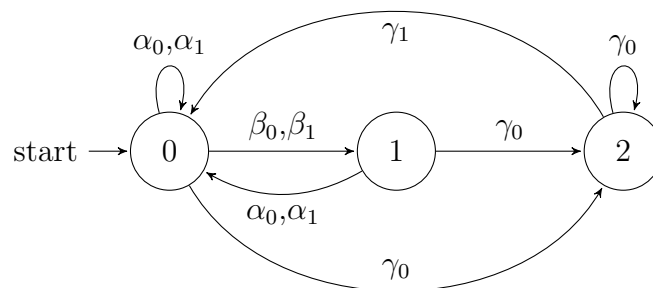


Figura 4.19: Máquina de estado finito para o autômato do SG.

O SG recebe os seguintes eventos do SL:

- $\alpha_0$  -  $THD \leq 5\%$ ;
- $\alpha_1$  -  $|\Delta THD| \leq 1\%$ ;
- $\beta_0$  -  $THD > 5\%$ ;
- $\beta_1$  -  $|\Delta THD| > 1\%$ .

Os eventos enviados pelo SG são:

- $\gamma_0$  - envia pedido de medidas ao SL;
- $\gamma_1$  - envia novas referências para o SL (caso uma nova referência não tenha sido encontrada pelo algoritmo de iteração, o SG reenvia a última referência).

### Descrição dos estados do SG

O autômato é definido como sendo um modelo matemático de uma máquina de estados finitos, a qual funciona como uma reconhecedora de estados que determina uma sequência de operações/estados, onde cada evento reconhecido gera uma mudança de estado, e cada estado do SG exerce uma operação, que são descritas por um algoritmo. Os estados do SG são explanados a seguir.

#### Estado 0

Neste estado, o SG encontra-se em espera (*Idle*, ou estado de espera). Considera-se que todos os PACs estejam atendendo aos limites de qualidade de energia ( $THD < 5\%$  e  $IHD < 3\%$ ) e que não houve nenhuma alteração considerável de carga (sistema está operando de forma ótima). Os APLCs estão operando com as últimas referências enviadas pelo SG. Neste estado, poderia ser implementado um estimador de carga para detectar variações diárias, visto que essas seguem um padrão e o SG tem armazenado as matrizes de estados do sistema.

#### Estado 1

O SG passa do Estado 0 para o Estado 1 quando algum limite dos índices de qualidade de energia não é satisfeito, ou quando há uma variação de alguns índices superior aos determinados pelo SL,  $\{\Delta THD, \Delta IHD\} > 1\%$ . Neste caso, o SG decide se o SL deve enviar as medidas discretas de tensão para recalcular as referências. Caso sim, o SG envia pedido, caso não, esse volta ao estado 0.

## Estado 2

Quando o SG está no Estado 2, é executado o fluxograma da Figura 4.20. O fluxograma descreve o algoritmo implementado em que as referências de operação do APLC são calculadas. O algoritmo opera com um método iterativo para encontrar a solução ótima global de funcionamento dos APLCs. Entretanto, se depois de alcançar o número máximo de iterações,  $iterM$ , uma solução ótima não for encontrada, o SG envia um sinal para os APLC continuarem com as referências anteriores e requisita novas medições de tensão.

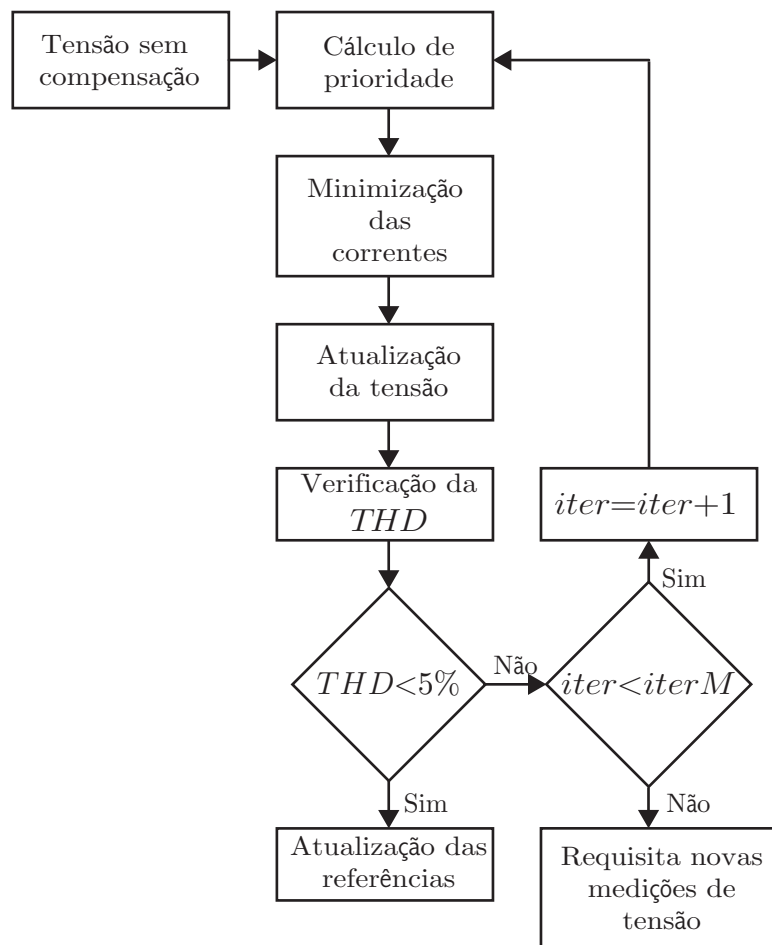


Figura 4.20: Fluxograma para determinar as THDs de referência para os APLCs.

O fluxograma apresentado na Figura 4.20 é descrito a seguir:

*Tensão sem compensação:* neste passo, o SG adquire as tensões sem compensação que são enviadas pelo SL. As tensões são consideradas sem a compensação, pois se algum APLC está injetando corrente, os harmônicos do SEP estão sendo minimizados, o que reduz o nível de THD e não garante que as novas referências calculadas sejam ótimas.

Entretanto, nota-se que caso as tensões enviadas não sejam as sem compensação, os cálculos são os mesmos, somente não garantem resultado ótimo.

*Cálculo de Prioridade:* a partir da Equação (3.49) é calculado o PAC com maior sensibilidade. Esse ponto é identificado pela derivada de corrente, em outras palavras, o ponto que com a menor corrente resulta em maior minimização de forma global.

*Minimização das correntes:* as mínimas correntes são definidas solucionando o problema de otimização com restrições pelas Equações (3.27) e (3.28).

*Atualização das tensões e verificação da THD:* as tensões são atualizadas, substituindo as correntes encontradas na Equação (2.16). A partir das tensões calculadas, novos níveis de THD, Equação (2.18) são calculados para cada PAC.

*Verificação da número da iteração atual ( $iter$ ):* se  $iter \leq iterM$ ,  $iter$  é incrementado e o algoritmo retorna para o passo *Cálculo de Prioridade*, caso contrário, finaliza e requisita novas medição de tensão.

*Atualização das referências:* envia as novas referências dos APLCs são enviadas. Em (GEHRKE et al., 2012a), algoritmo semelhante foi implementado, entretanto, esse estado atualizava as correntes de referência dos compensadores. Em um sistema em tempo real, com a constante variação das cargas, é impossível controlar diretamente as correntes dos APLCs, portanto, o algoritmo foi modificado, de modo que somente as novas referências de THD para cada APLC fossem atualizadas. Assim, alterar a THD de referência resultará em uma compensação de THD de forma global em todos os PACs do SEP em estudo. As THDs enviadas são as últimas calculadas no passo *Atualização das tensão e verificação da THD* referentes ao PAC onde os APLCs estão instalados.

### 4.3.3 Sensibilidade dos PACs

Nos casos de vários PACs não satisfazerem os limites determinados pela (IEEE-STD.519, 1993), o SG recebe ao mesmo tempo informação de vários SLs. Devido a isso, esses devem ser organizados em filas de prioridade. A forma encontrada para determinar a sensibilidade dos pontos de acoplamento é descrita nesta seção.

A sensibilidade à corrente da carga é testada analisando o resultado de THD nos PACs. Uma carga com potência definida é alocada em um PAC do SEP, depois em outro, e assim consecutivamente, até que a carga tenha sido alocada em todos os PACs. Em cada PAC as variações dos valores de THD são analisadas em cada PAC, sendo o máximo valor armazenado. Depois que a carga foi alocada em todos os PACs, é possível avaliar em qual PAC que a carga foi instalada que produziu uma maior variação de THD. O estudo pode ser utilizado para determinar as ações de prioridade no caso de muitos eventos ocorrerem, esse também pode definir o limite de histerese para o sistema de coordenação dos APLCs bem como determinar quais PACs devem ser monitorados no caso de redução do número de SLs.

Tabela 4.1: Resultado da análise de sensibilidade à carga.

k	<i>mTHD</i>	<i>aTHD</i>	k	<i>mTHD</i>	<i>aTHD</i>
2	4,5538	3,1273	20	4,2970	3,2254
3	4,3657	3,7507	21	5,7381	4,0777
4	6,4806	4,2742	22	5,4045	3,8605
5	8,0430	5,3765	23	7,8695	5,5110
6	8,1963	5,4864	24	8,6996	6,2374
7	8,4581	5,7291	25	8,2742	5,9182
8	8,2138	5,5501	26	8,0119	5,7210
9	4,4524	3,0592			

A ordem de prioridade é determinada pela análise do máximo nível de THD. Analisando do PAC menos para o mais sensível a ordem de prioridade é dada por 20, 3, 9, 2, 22, 21, 4, 23, 26, 5, 6, 8, 25, 7, 24. Entretanto, a ordem de prioridade apresenta melhores resultados quando avaliada por ramos, portanto a prioridade do ramo 1 é: 3, 9, 2, 4, 5, 6, 8, 7; e a prioridade do ramo 2 é: 20, 22, 21, 23, 26, 25, 24. Observa-se que o PAC mais sensível entre todos é o 24 para o SEP estudado. No controle cooperativo, esse PAC teria um limite de histerese bem restrito, porque com uma pequena variação desse, isso afetaria significativamente a maioria dos PACs. Por outro lado, o PAC 20 é o menos sensível, portanto, pode ter esse uma histerese com limites mais relaxados.

## 4.4 Resultados

O circuito da Figura 4.21 foi utilizado para demonstrar a minimização de harmônicos pela ação do controle proposto e, principalmente, para avaliar a estabilidade frente aos diferentes elementos presentes em uma rede. O SEP de referência é o mesmo utilizado no estudo da localização, Figura 3.11, contudo, o modelo apresenta, além dos segmentos de linha e banco de capacitores, cargas não lineares, reguladores de tensão, geradores distribuídos e os APLCs instalados nos PACs ótimos. O sistema foi avaliado em sistema p.u., para melhor visualização dos resultados, sendo a tensão base 12,5 kV e a potência 10 MVA.

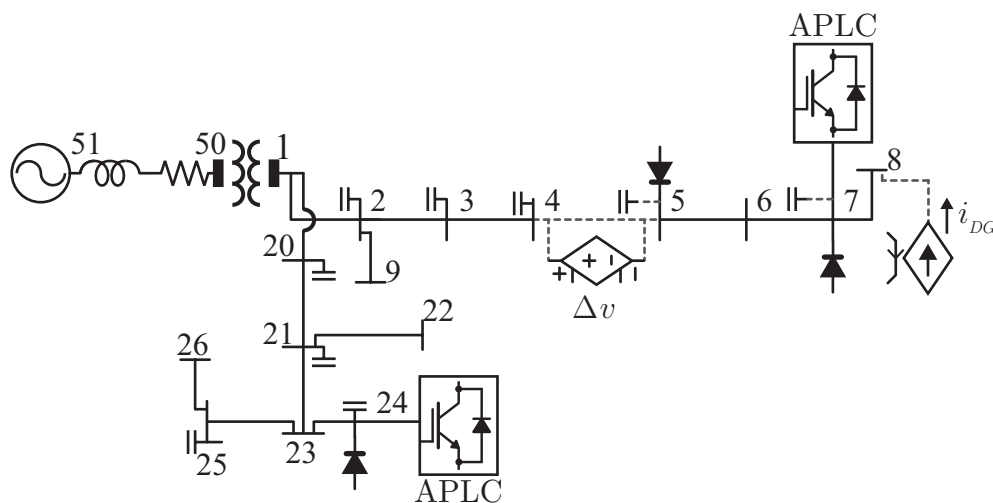


Figura 4.21: Representação simplificada do SEP de referência de 18 PACs (GRADY et al., 1991).

As cargas não lineares representam retificadores não controlados e foram alocadas em PACs que já utilizados em outros trabalhos e/ou que apresentaram maior influência no SEP pela análise de sensibilidade. As cargas não lineares foram instaladas nos PACs 5, 7 e 24. Os valores das corrente por ordem de harmônico foram descritos na Tabela 3.1.

Os APLCs foram instalados nos PACs 7 e 24, esse pontos foram resultado do estudo do capítulo anterior de localização e dimensionamento. O modelo do APLC utilizado foi apresentado na Figura 2.4(c) e os parâmetros utilizados são descritos na Tabela 4.2.

Com o cenário base definido, a influência de cada elemento é estudada separadamente. Primeiro, a robustez da planta é avaliada, seguido pelo estudo da estabilidade frente a variação de cargas, ao chaveamento de bancos de capacitores, a inserção de um regulador de tensão e a conexão de um gerador distribuído. Logo após, o controle proposto é comparado

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados do APLC.

Parâmetros	Valores
Impedância de acoplamento do APLC	$L_f = 2 \text{ mH}$
Tensão do barramento CC	$V_{DC} = 1.5 \text{ p.u.}$
Corrente máxima	$I_{\max} = 0.1 \text{ p.u.}$

com outros controles cooperativos/distribuídos de APLCs em operação normal e em caso de falta (em que o sistema é re combinado e os APLCs passam a operar no mesmo PAC). Por fim, a coordenação é investigada.

#### 4.4.1 Identificação da planta e análise da estabilidade

Para obter a planta foi utilizado identificação de sistemas, que permitem construir modelos dinâmicos a partir de dados medidos para um tempo determinado. Nesse sentido, a partir dos dados da entrada e da saída, a identificação da planta foi implementada baseada na Equação (4.9). Foram considerados para obtenção do modelo: a corrente de entrada e a tensão de saída, filtro  $H_f$  *Basic State Variable Filter*, tempo de simulação total de 0,833 s e passo de cálculo de 0,00002 s. A ordem do sistema foi determinada pela função de transferência obtida para  $G(s)$ , Equação (4.6). O procedimento implementado para obter todas as impedâncias da matriz é descrito nos passos a seguir:

1. Aplicar uma corrente senoidal com amplitude unitária no PAC 7 do SEP e medir a tensão nos PACs 7 e 24, identificando as impedâncias da primeira linha da matriz, denominadas de  $z_{(7,7,h)}$  e  $z_{(7,24,h)}$ .
2. Aplicar uma corrente senoidal com amplitude unitária no PAC 24 e medir a tensão nos PACs 7 e 24, obtendo as impedâncias  $z_{(24,7,h)}$  e  $z_{(24,24,h)}$ .

Salienta-se que em cada passo somente uma fonte é alimentada, sendo as demais mantidas em zero.



As impedâncias obtidas considerando  $h = 5$  são apresentadas a seguir, lembrando que

$$z_{(7,24h)} = z_{(24,7,h)}.$$

$$z_{(7,7,5)} = \frac{3,9 \times 10^5 s + 1,0 \cdot 10^9}{s^2 + 4,3 \times 10^4 s + 1,7 \times 10^9}, \quad (4.38)$$

$$z_{(24,7,5)} = \frac{-8,5 \times 10^5 s - 3,8 \cdot 10^8}{s^2 + 4,1 \times 10^4 s + 1,7 \times 10^9}, \quad (4.39)$$

$$z_{(24,24,5)} = \frac{2,3 \times 10^5 s + 290,8}{s^2 + 4,3 \times 10^5 s + 0,3767}. \quad (4.40)$$

Na Figura 4.22, são ilustradas as tensões medidas e as saídas das funções transferências obtidas.

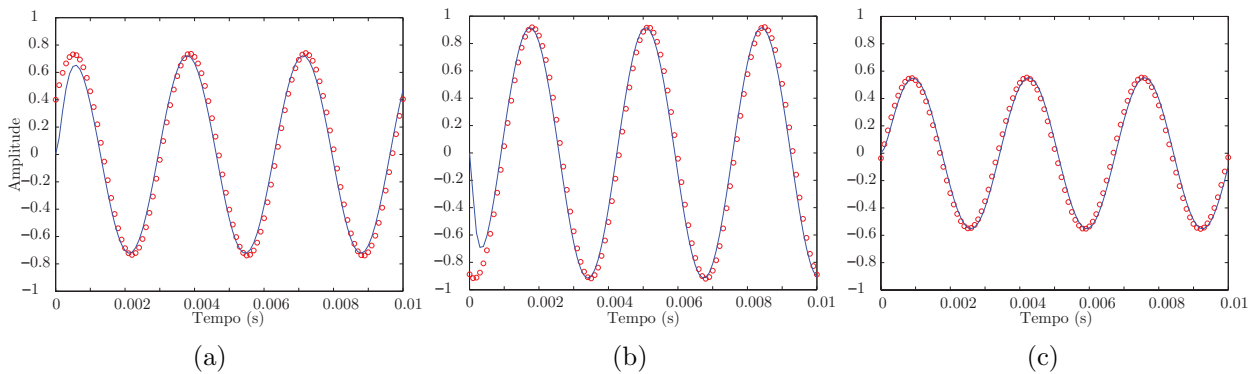


Figura 4.22: As respostas para: a)  $z_{(7,7,5)}$ , b)  $z_{(24,7,5)}$  e c)  $z_{(24,24,5)}$  são apresentadas. Linha contínua: resposta identificada. Linha pontilhada: resposta identificada.

Observa-se que tanto no transitório como em regime permanente, as plantas foram determinadas com a ordem da função de transferência definida pelo estudo preliminar, conforme Equação (4.6). As impedâncias resultantes também foram semelhantes as apresentadas na matriz impedância, conforme descrito na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Amplitudes e ângulos das impedâncias resultantes da planta estimada e da matriz impedância para o harmônico  $h = 5$ .

	Estimada		Matriz	
	Amplitude	Ângulo	Amplitude	Ângulo
$G_{11,5}$	0,75	32	0,70	36
$G_{12,5}$	0,96	-105	0,89	-108
$G_{22,5}$	0,55	-0,25	0,61	2

Para verificar a linearidade das respostas das plantas, dois testes foram feitos. Primeiro, foram aplicadas correntes senoidais nos PACs 7 e 24, o resultado da tensão do PAC 7 é

ilustrado na Figura 4.23(a). O segundo teste avaliou a interação entre as funções de transferências que foram obtidas para todo o vetor  $h$ . Na Figura 4.23(b), o resultado das tensões medidas e identificadas do PAC 7 é ilustrado, em que a entrada é uma corrente com diferentes harmônicos injetada no PAC 7.

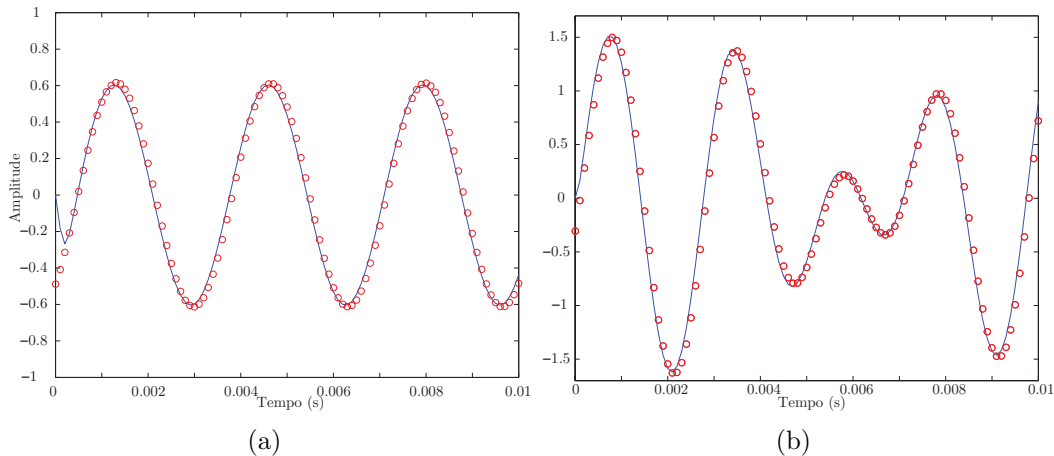


Figura 4.23: Respostas medidas e identificadas, considerando como entrada: a) corrente senoidal,  $h=5$ , nos PAC 7 e 24; b) corrente senoidal  $h=[5, 7]$ , nos PAC 7.

A partir das funções de transferência é possível verificar a estabilidade e a robustez do controle, no qual a Equação 4.22 de malha fechada e a Equação 4.17 de sensibilidade são analisadas. Para analisar, a variação de impedância do SEP, uma planta sem dois bancos de capacitores (PACs 5 e 7) foi identificada, sendo a sensibilidade dessa comparada a da planta nominal. Considerou-se como para a primeira análise o PAC 7 com influência dos dois APLCs. Na Figura 4.24, as respostas ao degrau para diferentes ganhos, considerando malha fechada, são ilustrados. Observa-se que com o aumento do ganho, a resposta da planta nominal, Figura 4.24(a), é mais rápida, entretanto, mais oscilatória. A planta com variação de parâmetro tem o mesmo comportamento, contudo é instável com o maior ganho.

Na Figura 4.25 são ilustradas as respostas do diagrama de bode para a malha fechada, considerando as duas plantas com variação de ganhos. Percebe-se que com o aumento do ganho, a resposta da malha fechada da planta nominal fica reta por uma largura de banda maior, Figura 4.25(a), e para a planta com variação de parâmetro, Figura 4.25(b), na qual pode ser verificado a instabilidade apresentada na resposta ao degrau.

Para finalizar a análise, na Figura 4.26, a sensibilidade é ilustrada para a planta nominal e para a planta com variação de parâmetro.

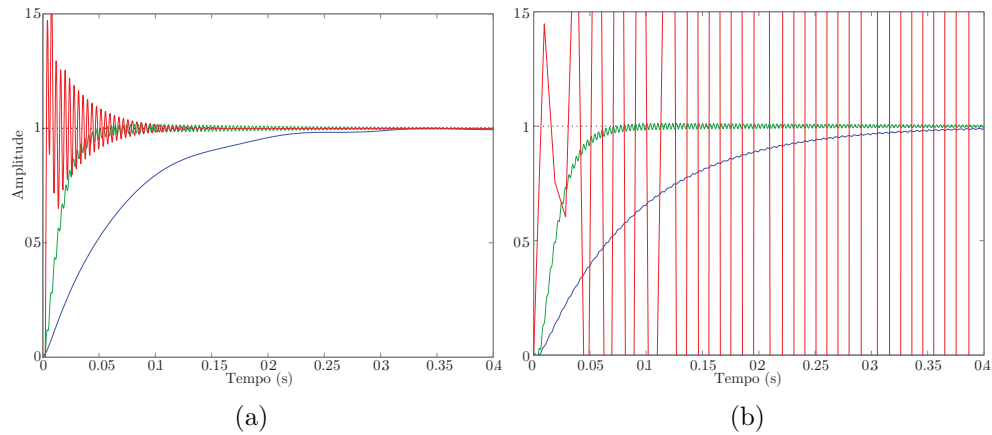


Figura 4.24: Resposta ao degrau com diferentes ganhos para malha fechada, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro.

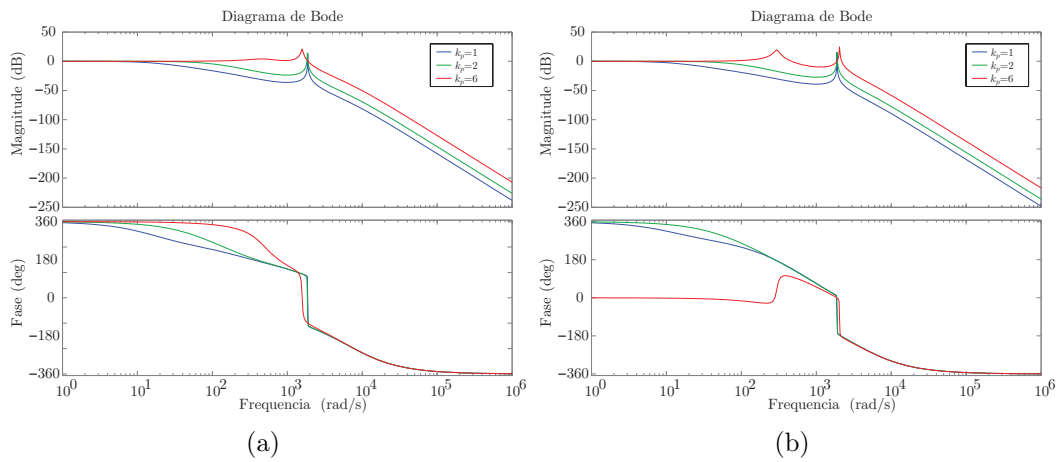


Figura 4.25: Resposta de bode com diferentes ganhos para malha fechada, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro.

O PAC 24 apresentou respostas semelhantes ao PAC 7, por isso, os resultados não serão repetidos.

### 4.4.2 Análise do controle sob variações do SEP

Nesta seção, testes de robustez do controlador são implementados frente a variações de carga, chaveamento de capacitores, entre outros elementos. Para cada teste, serão especificados os problemas e os procedimentos adotados. A análise de sensibilidade, seção 4.3.3, foi a base para a escolha dos PACs em que a variação seria imposta.

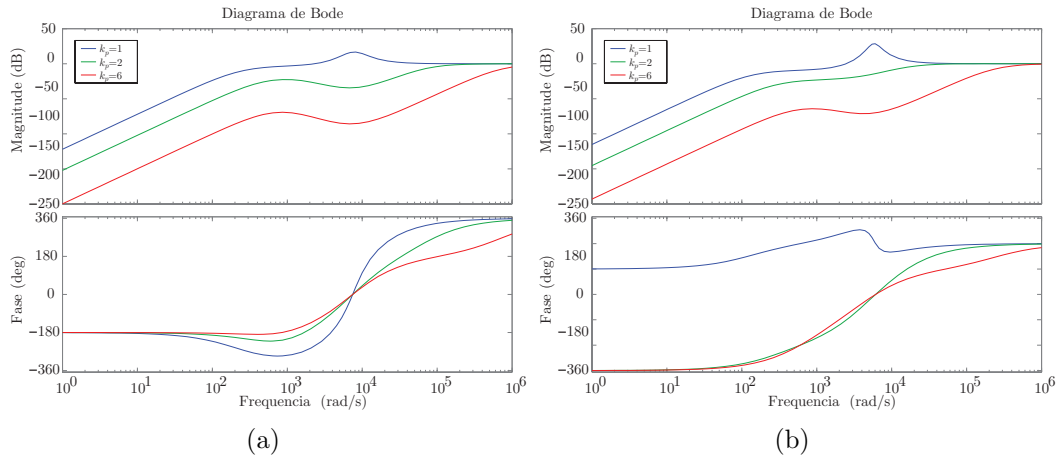


Figura 4.26: Resposta de bode com diferentes ganhos da sensibilidade, a) planta nominal e b) planta com variação de parâmetro.

### Variação de carga

A dinâmica da rede é contínua, neste caso o controle deve atuar com a constante transição de cargas. Os transitórios são capazes de perturbar a operação normal do sistema, e portanto, o controle deve atuar de forma a minimizar esses efeitos, mantendo o sistema operando, sempre que possível, dentro de limites especificados em normas. Principalmente, o controle deve permanecer estável durante essas variações. Salientando que os transitórios de cargas afetam diretamente o nível de THD.

Para testar a estabilidade e operação do controle proposto, uma transição de carga foi testada em  $t=0,85$  s, conectando a carga fonte tensão no PAC 7. Na Figura 4.27 é ilustrada a THD sem compensação do APLC, logo se observa que o nível de  $THD_{(24)}$  eleva levemente, enquanto  $THD_{(7)}$  reduz, embora em ambos PACs a  $THD > 5\%$ .

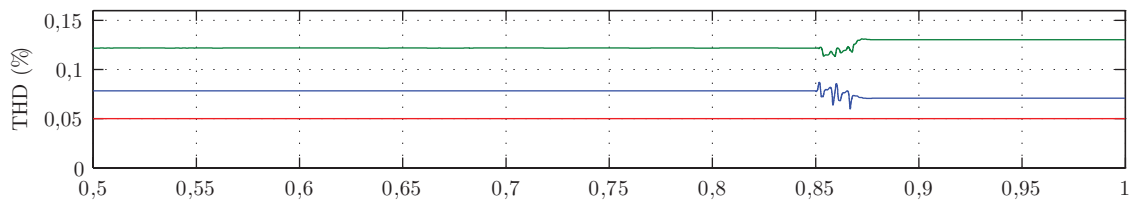


Figura 4.27: Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que a carga varia em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ .

Para mostrar a influência dos APLCs, na Figura 4.28, é ilustrada a variação do nível de tensão e da distorção harmônica de tensão no tempo. Sem a ação do controle, ambas

as tensões,  $v_{(7)}$  e  $v_{(24)}$ , estão visivelmente distorcidas, Figura 4.28(b)-cenário 1. Depois da compensação, as tensões apresentam forma de onda quase senoidais, Figura 4.28(b)-cenário 2. Percebe-se que o sinal ainda apresenta harmônicos, mas apresenta  $\text{THD} \leq 5\%$ , como pode ser comprovado ao comparar os valores resultantes com a referência, conforme Figura 4.28(c). Em relação ao distúrbio, o nível de THD oscilou, Figura 4.28(c), mas foi rapidamente regulado, Figura 4.28(b)-cenário 3. Como esperado, não foram apresentados problemas de estabilidade frente a carga fonte de tensão. Salienta-se que nos demais testes são utilizadas fontes de corrente como cargas não lineares.

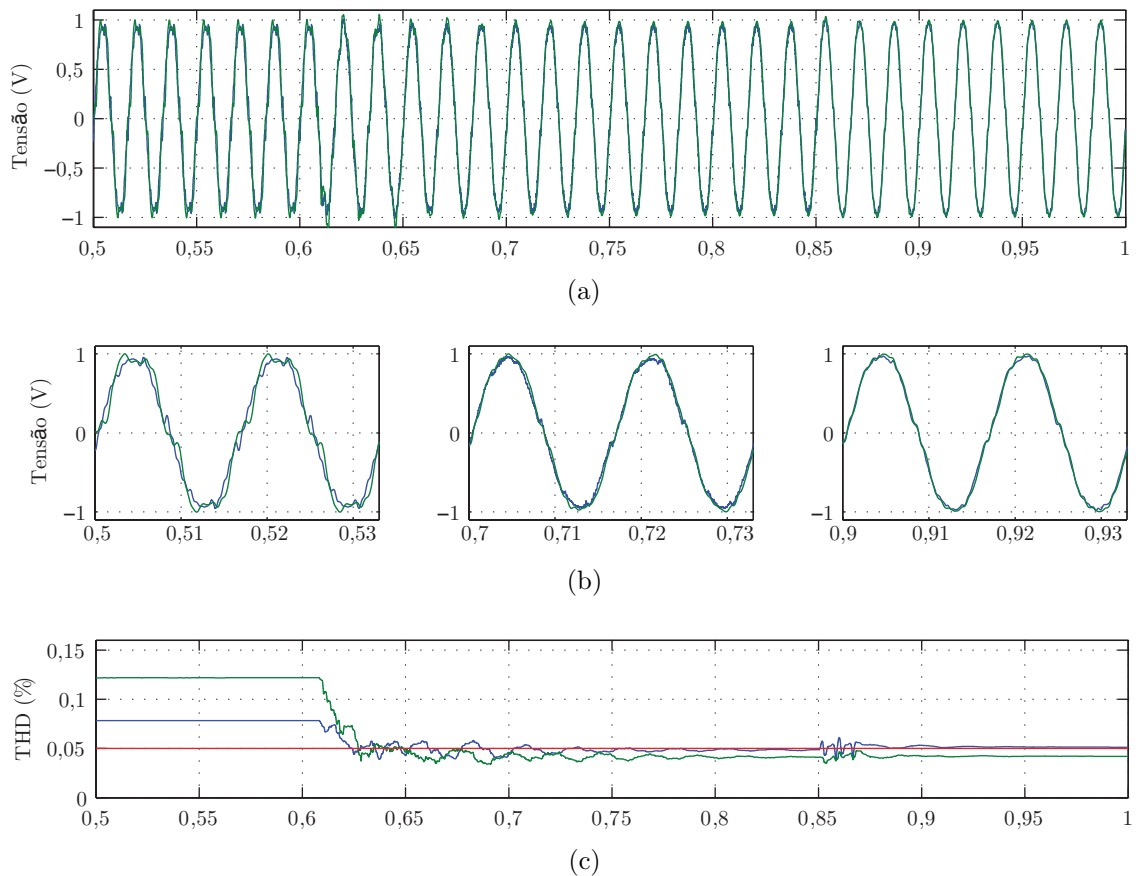


Figura 4.28: Resultados da influência da variação de carga. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) regime permanente das tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD.

A ação do controle no tempo, em relação a corrente de compensação e ganhos do controle, é ilustrada na Figura 4.29. Ao iniciar a operação de compensação, a corrente passa por um transitório, e em seguida é regulada, Figura 4.29(a). Quando a carga é conectada, a corrente

$I_{(7)}$  tem um leve aumento, comparando as Figuras 4.29(b)-cenário 2 e 3. Esse aumento, é devido ao aumento da THD resultante da conexão da carga. Percebe-se que o ganho de IHD aumenta, Figura 4.29(c), assim como o ganho da THD, Figura 4.29(d), pois somente o controle de IHD não foi suficiente para manter a distorção abaixo dos níveis regulamentados.

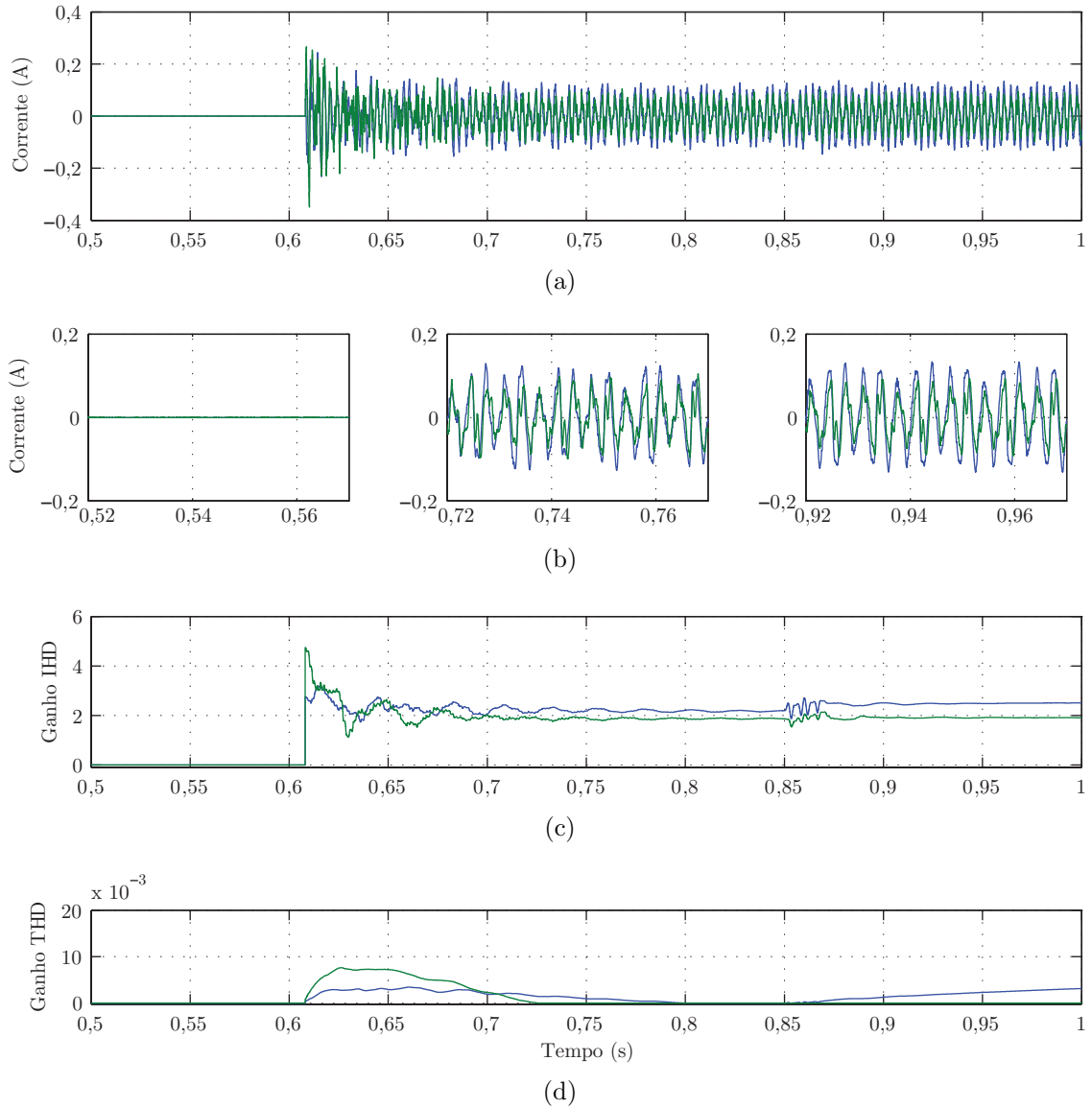


Figura 4.29: Resultados da influência da variação de carga no tempo. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ .

## Chaveamento de banco de capacitores

Para compensar o nível da tensão, uma das soluções é a utilização de bancos de capacitores, que aumentam o fator de potência no ponto em que são conectados. Esses são conectados ao sistema quando necessário, ocasionando uma transição, que altera a impedância do circuito. Dessa forma, o chaveamento de bancos de capacitores afeta indiretamente o nível de THD, visto que a THD de tensão é resultado da influência da corrente distorcida na impedância da rede. O chaveamento também pode interferir na estabilidade do sistema e consequentemente do controle.

Os resultados foram obtidos com a transição em  $t=0,85$  s, em que são conectados os bancos de capacitores dos PACs 5 e 7. O nível de THD sem a operação de compensação dos APLCs é ilustrada na Figura 4.30. Nota-se que, com a conexão dos capacitores, o nível de  $THD_{(24)}$ , PAC mais longe do local do chaveamento, reduz significativamente, entretanto, em ambos os pontos e durante todo o tempo, o nível é maior que 5%.

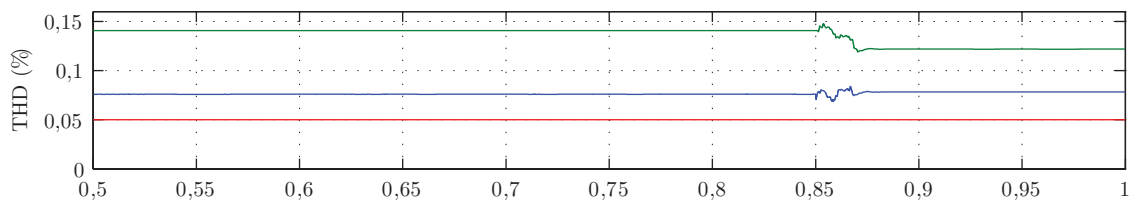


Figura 4.30: Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, no chaveamento de dois bancos de capacitores em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ .

A influência dos APLCs na variação do nível de tensão e da distorção harmônica de tensão no tempo é ilustrada na Figura 4.31. Antes da compensação, a forma de onda de tensão está bem distorcida, Figura 4.31(b)-cenário 1, porém com a ação do controle, a distorção foi reduzida, Figura 4.31(b)-cenário 2, de  $THD_{(7)}$  de 7,5% para 5% e  $THD_{(24)}$  de 14% também para 5%, Figura 4.31(c). Com a conexão dos capacitores, a forma de onda melhora, Figura 4.31(b)-cenário 3, sendo a ação do controle explicada a seguir.

Na Figura 4.32 é ilustrada a ação do controle. Observa-se que, no momento que os bancos de capacitores não estão conectados, o ganho de THD está operando para suplementar o controle de IHD. No momento da conexão, a THD diminui, por isso a corrente pode ser reduzida. Para reduzir a corrente, o ganho  $\Delta I^*$  converge para zero, Figura 4.32(d). Como analisado anteriormente, quando os bancos de capacitores não estão conectados a estabilidade

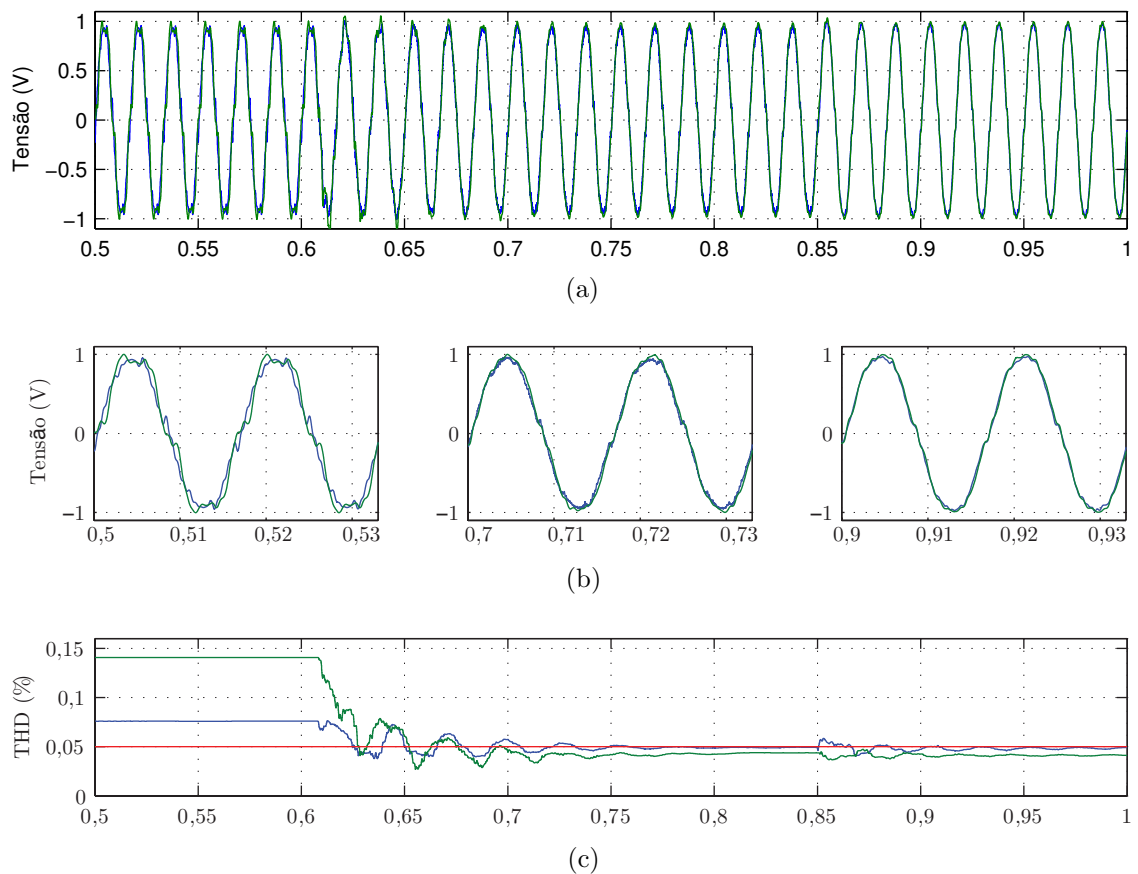


Figura 4.31: Resultados da influência do chaveamento de capacitores no tempo. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD.

da planta é menor, entretanto, com o projeto do controle utilizado, esse se mostrou robusto até para essa situação. Observa-se que, em  $t=0,85$  s, o distúrbio foi rapidamente controlado. O ganho controlado pela THD, que era 0,005 p.u., foi para zero, e os ganhos controlados pela IHD sofreram leves oscilações. Ambos os níveis de distorção harmônica foram mantido abaixo dos limites estabelecidos pela norma IEEE-519.

## Regulador de tensão

Além do banco de capacitores, outras estratégias são utilizadas para regular o nível da tensão das redes, como autotransformadores com ajuste automático de tap, que permitem elevar ou abaixar a tensão. Os reguladores possuem uma faixa de regulação de  $\pm 0,1$  p.u.,



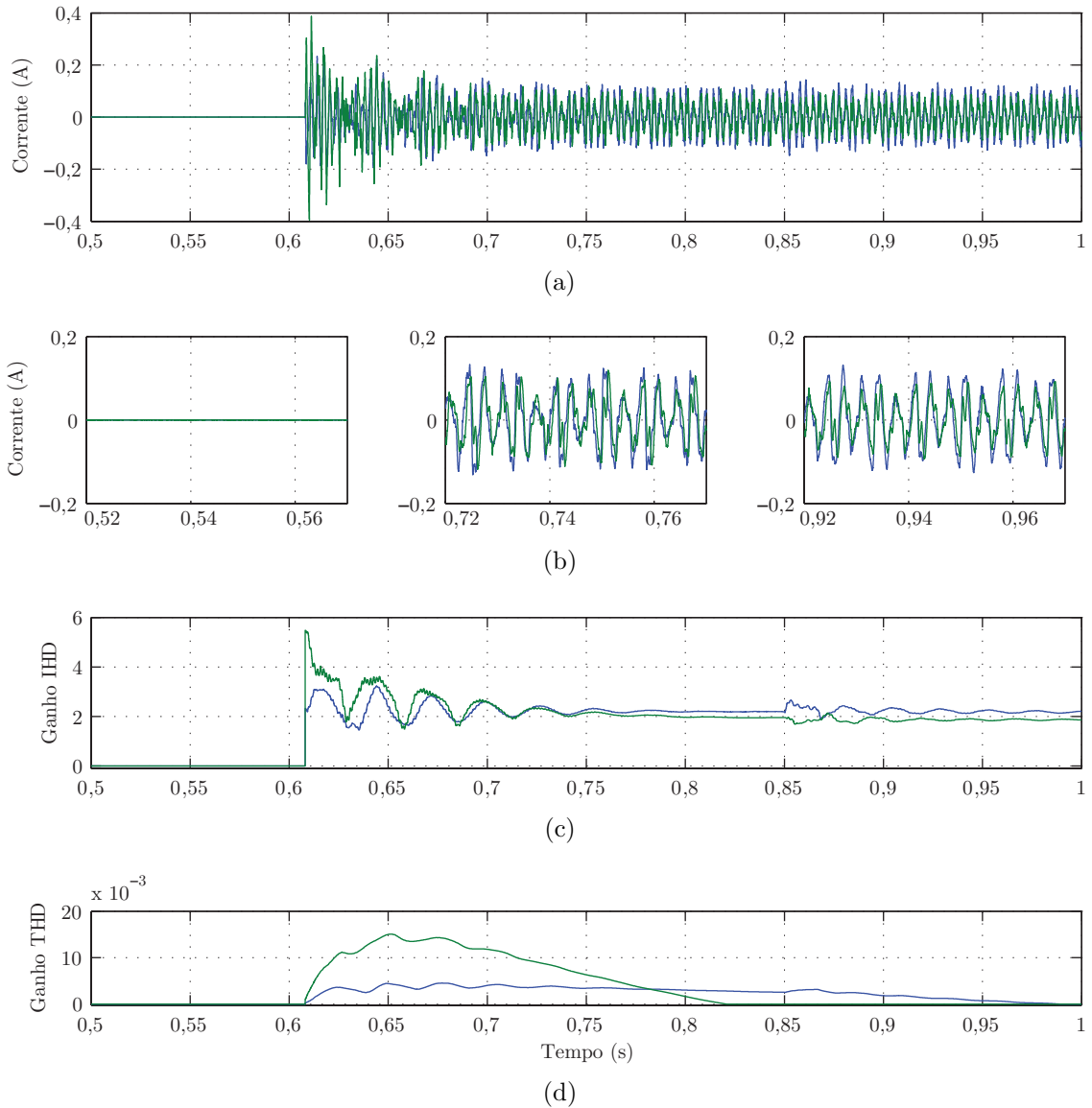


Figura 4.32: Resultados da influência do chaveamento de capacitores. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ .

mas normalmente, operam entre 0,01 p.u. a 0,02 p.u.. Os reguladores, elevam o nível de tensão dos segmentos conseguintes ao ponto de instalação.

Para representar o regulador, foi utilizado um fonte de tensão em série com a linha, entre os PACs 4 e 5, pois usualmente são instalados do meio para o fim da linha. Neste caso, os bancos de capacitores nos PACs 5 e 7, permaneceram desconectados, sendo o aumento do nível de tensão resultado unicamente do regulador de tensão. A transição para a conexão

é feita em  $t=0,85$  s, com uma elevação de 0,02 p.u.. Na Figura 4.33, o nível de THD sem compensação é ilustrada, e com a conexão do regulador, um pequeno distúrbio ocorre sem alterar significativamente a distorção.

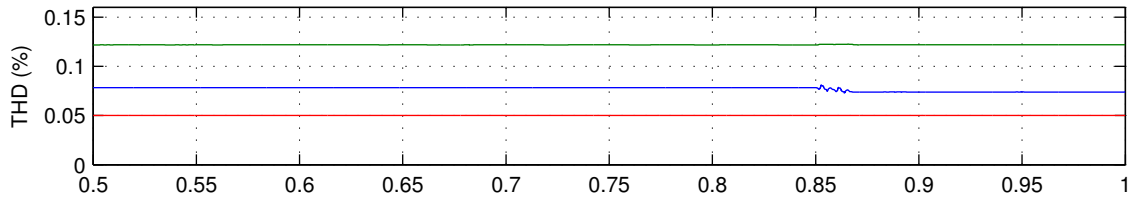


Figura 4.33: Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que o regulador de tensão é conectado em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ .

Para demonstrar a influência dos APLCs, na Figura 4.34, são ilustrados os transitórios do nível de tensão e da distorção harmônica de tensão. Com o início da ação do controle, a THD que estava acima do nível foi regulada, Figura 4.34(c). Com a conexão do regulador o controle apresentou robustez, não apresentando instabilidades, e ainda minimizou o transitório devido ao distúrbio causado pela conexão do regulador.

Para ilustrar a operação dos APLCs em relação a corrente de compensação e ganhos do controle, na Figura 4.35 é ilustrada a variação desses no tempo. Nota-se que, apesar do nível de THD não ter alterado significativamente com a conexão do regulador, a corrente do APLC pode ser reduzida, fato que pode ser claramente visível analisando o ganho de THD,  $\Delta I^*$ , Figura 4.35(d).

## Geração Distribuída

A partir de 17 de abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL no 482/2012, em que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. A DG também já é uma realidade em outros países. Com a inserção dessa ao sistema, há uma redução de perdas nas linhas, devido a fonte estar mais próxima a carga. Contudo, problemas com harmônicos e estabilidade podem ocorrer, por isso as normas para conexão desses são bem restritas. A conexão da  $\text{acDG}$  puramente senoidal, eleva a tensão nominal, reduzindo a THD, como pode ser analisado pela equação (2.18).

Para a análise da conexão do gerador distribuído, esse foi representado por uma fonte

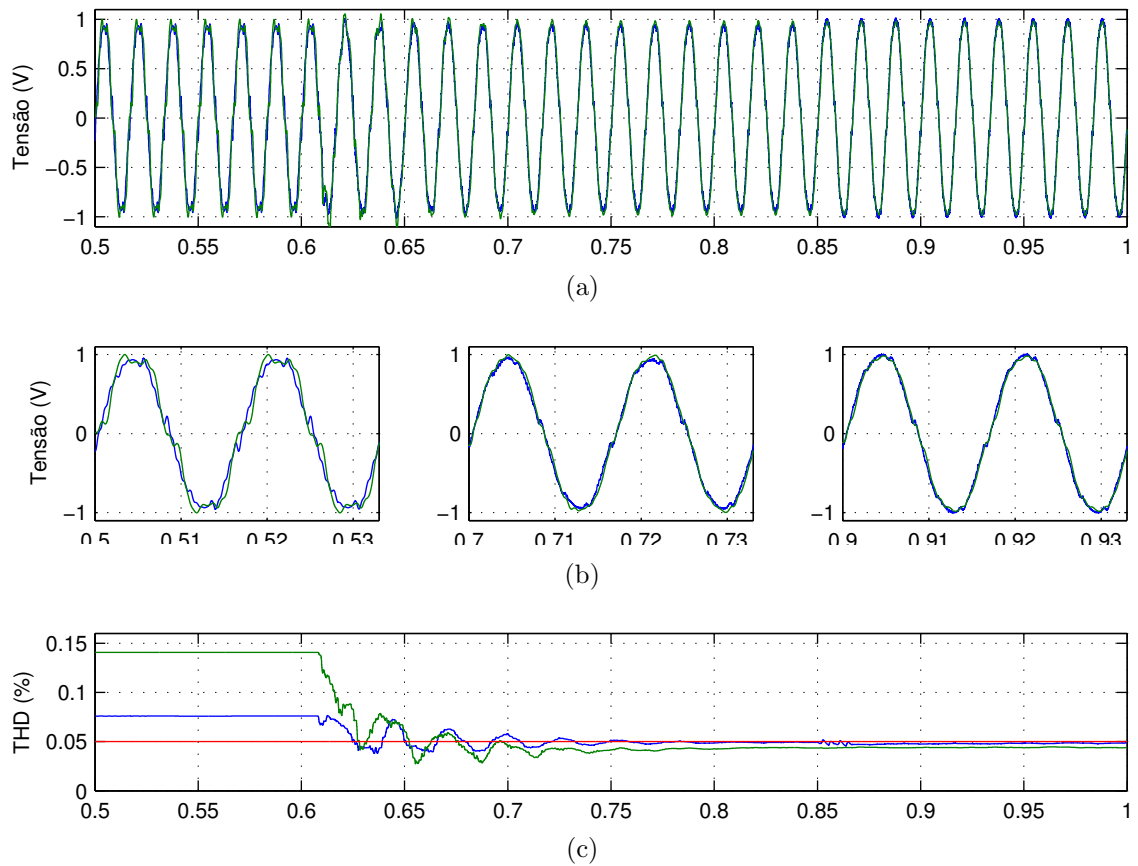


Figura 4.34: Resultados da influência da conexão do regulador de tensão. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD.

de corrente conectado em paralelo no PAC 8 em  $t=0,85$  s. A potência ativa fornecida é de 1 p.u.. Assim como o regulador de tensão, a DG não afetou significativamente o nível de THD, Figura 4.36.

Na Figura 4.37, é ilustrada a variação do nível de tensão e da distorção harmônica de tensão para demonstrar a influência dos APLCs. Antes da DG ser conectada, o controle começa a operar, regulando os níveis de distorção harmônica, Figura 4.37(b)-cenário 2. Após a conexão, por apresentar maior influência na frequência fundamental, a DG não afetou de forma significativa a ação do controle, porém a forma de onda do PAC 7, mais próximo ao DG, melhorou sutilmente, Figura 4.37(b)-cenário 3.

Para demonstrar a operação dos APLCs em relação a corrente de compensação e ganhos

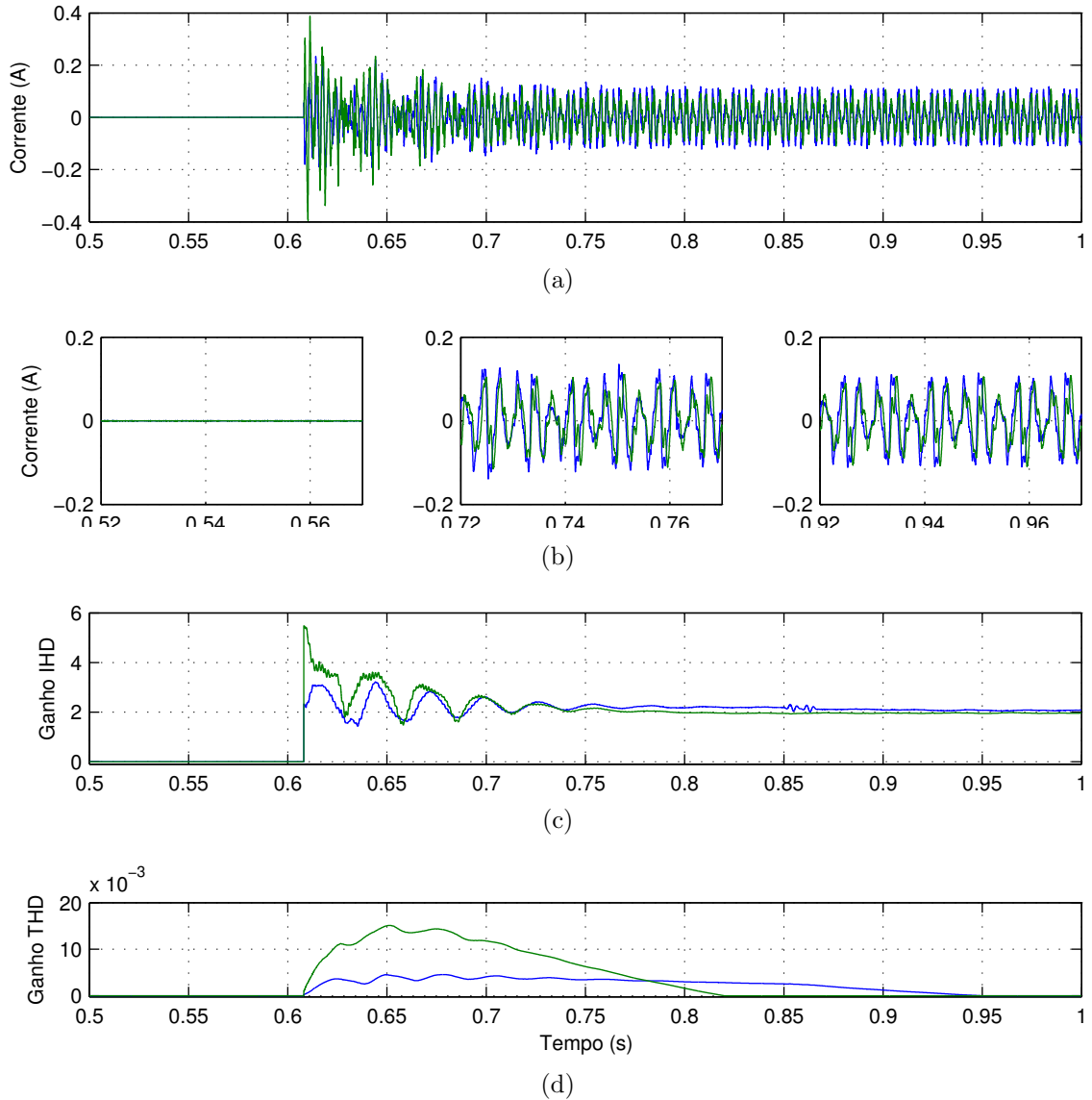


Figura 4.35: Resultados da influência da conexão do regulador de tensão Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ .

do controle, os resultados dos transitórios são ilustrados na Figura 4.38. Como já mencionado, o controle não teve problemas de concorrência com a DG e não apresentou variações na operação do controle.

Pela análise da variação de elementos no SEP, percebe-se que distúrbios aditivos como adição de fontes de correntes e tensão operando com frequência fundamental, não afetam significativamente nos níveis de THD e IHD, portanto não geram instabilidades no controle.

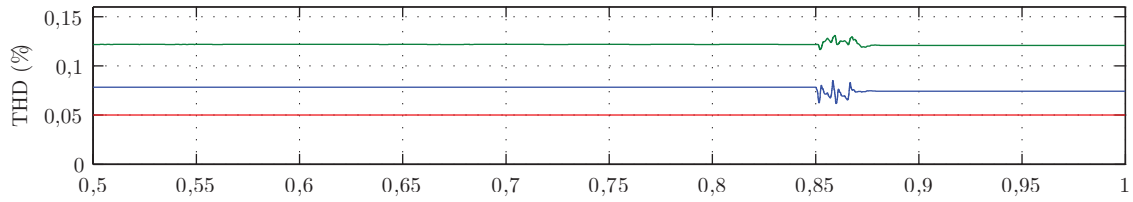
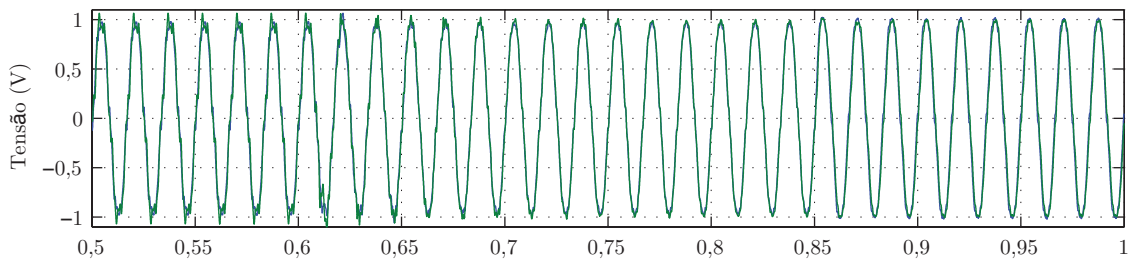
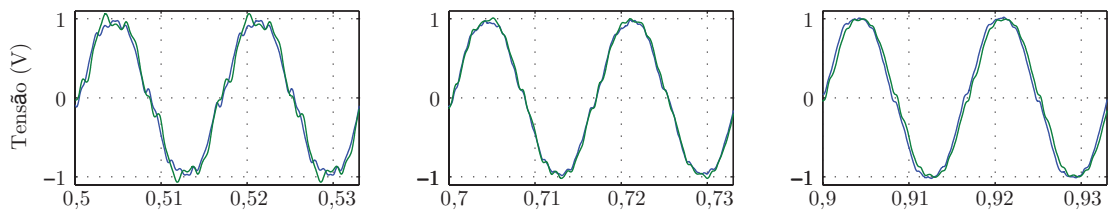


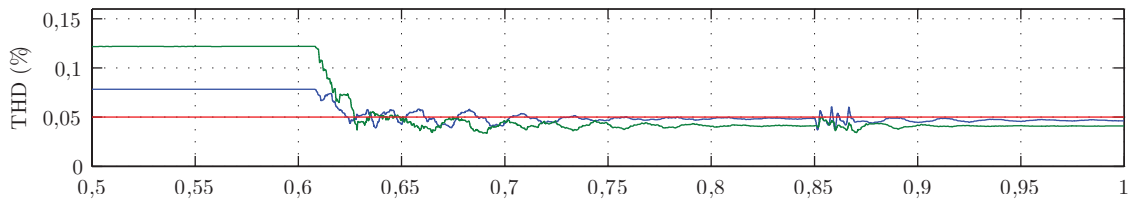
Figura 4.36: Variação do nível de THD sem a operação dos APLCs, em que a DG é conectado em  $t=0,85$  s. Vermelho: referência, Azul:  $THD_{(7)}$  e Verde:  $THD_{(24)}$ .



(a)



(b)



(c)

Figura 4.37: Resultados da influência da conexão da DG. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da tensão dos PACs, b) tensão dos PACs para cada cenário e c) variação de THD.

A sensibilidade do controle é maior em relação a variação da impedância, entretanto, com a sintonia utilizada, nenhum problema foi apresentado. O controle se mostrou robusto e sem problemas de concorrência com os demais elementos da rede.

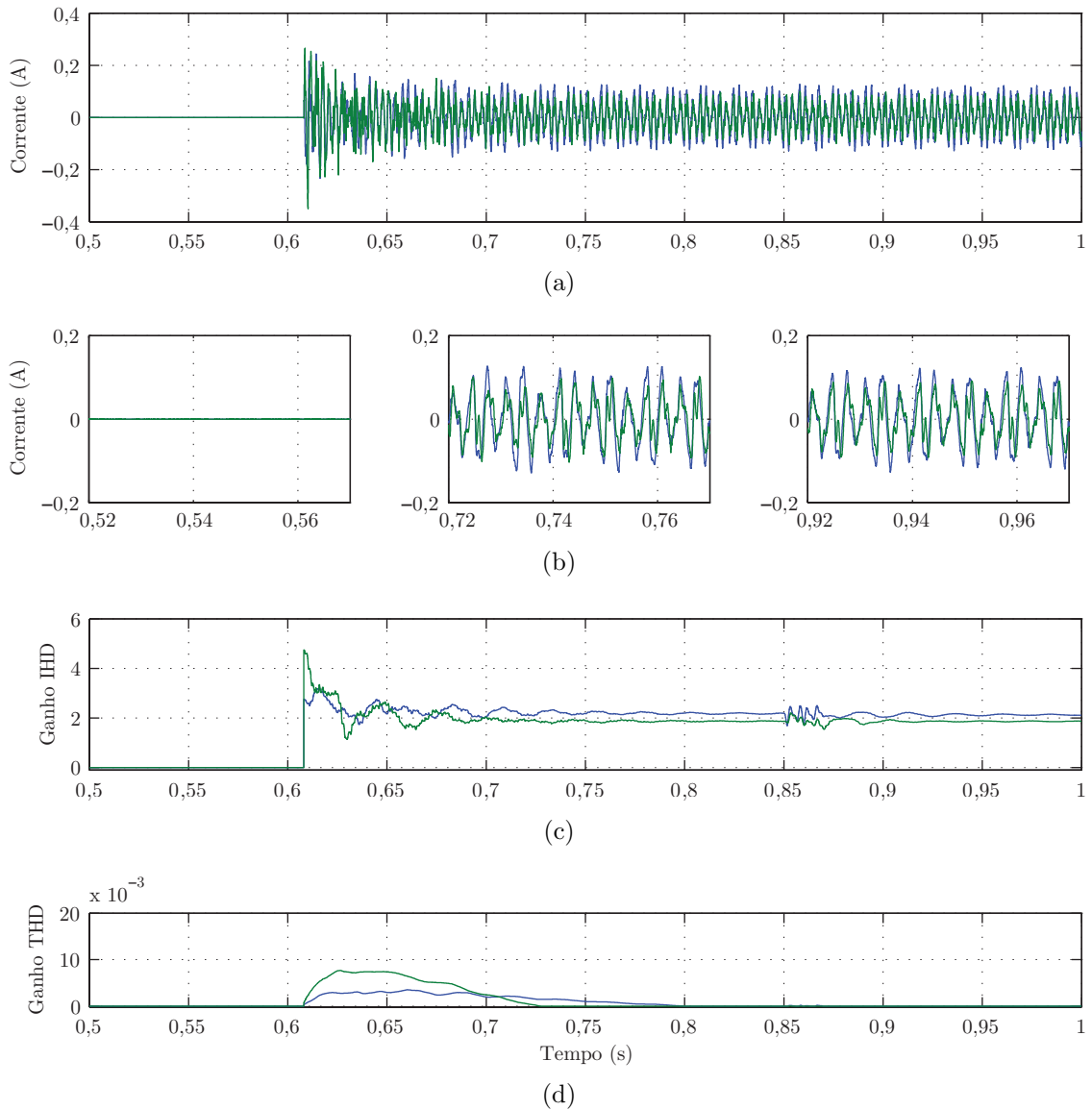


Figura 4.38: Resultados da influência da conexão da DG. Cenários: 1) sem operação do APLC ( $t=0,5$  a  $0,61$ ), 2) com compensação ( $t=0,61$  a  $0,85$ ) e 3) com variação da carga ( $t=0,85$  a  $1$ ). Os gráficos ilustram: a) transitórios da corrente dos APLCs, b) corrente dos APLCs para cada cenário, c) ganhos  $kgI$  e d) ganhos  $\Delta I^*$ .

### 4.4.3 Comparação das estratégias de controle

Para comparação com o controle proposto, foram testadas as três estratégias de CCM: detecção por corrente da carga, detecção por tensão com ganho automático (AKAGI, 1997) e ganho variando por decaimento, (LEE e CHENG, 2007), além da estratégia proposta. A carga não linear injeta no SEP harmônicos  $h=[5, 7, 9, 11, 13, 17, 19, 23$  e  $25]$ . Todos esses

harmônicos foram compensados pelas estratégias de controle, entretanto, as estratégias por detecção de tensão compensam somente uma porcentagem dos harmônicos para satisfazer a referência de THD.

A Figura 4.39 ilustra a performance da compensação por rejeição de harmônicos com detecção pela corrente da carga. Em um primeiro momento, a carga está sendo alimentada completamente pelo SEP e o APLC está com corrente zero. O resultado apresenta alta distorção harmônica na tensão do PAC, esse efeito se deve a queda de tensão harmônica na impedância do SEP. No instante  $t = 0,2$  s o APLC começa a atuar, e como esperado a unidade do APLC absorve a maioria dos harmônicos da carga não linear, melhorando a distorção harmônica de tensão do PAC bem como a corrente do SEP. Essa situação é ótima para uma carga específica, entretanto, na presença de outras cargas, o resultado seria a redução da THD pontual, e aumento dos demais PACs.

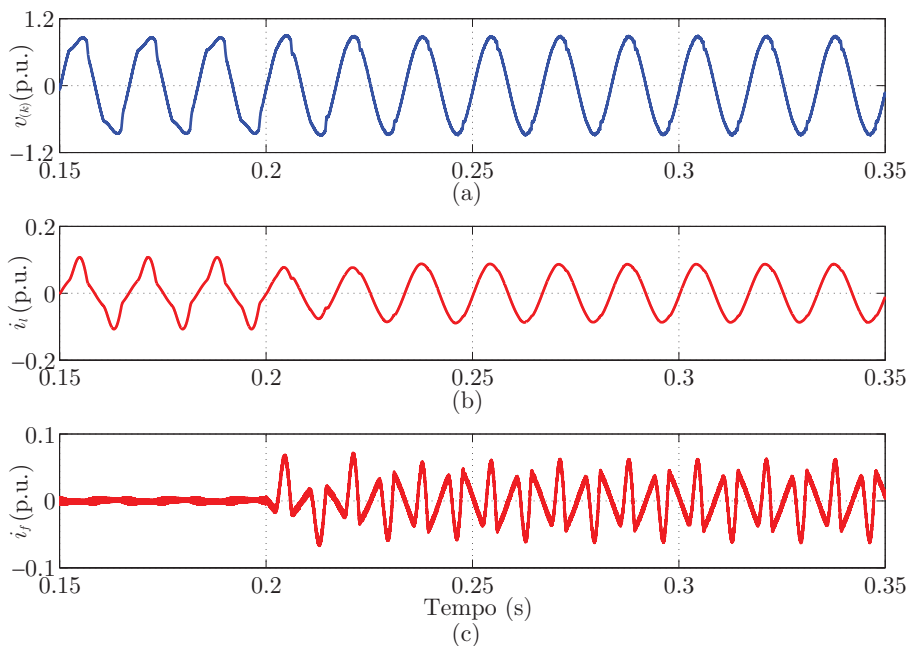


Figura 4.39: CCM com detecção pela corrente da carga, o APLC opera com rejeição harmônicos. (a) Tensão no PAC (V). (b) Corrente do SEP (A). (c) Corrente do APLC (A).

Na Figura 4.40 são apresentados os resultados da análise dos dados em relação ao nível de THD. Antes do APLC operar a THD da tensão do PAC e da corrente do SEP estão acima dos 5% que foi imposto como referência, (IEEE-STD.519, 1993),  $\text{THD} = 12\%$  e  $\text{THD} = 25\%$  respectivamente. Em  $t = 0,2$  s com a operação do APLC com compensação de harmônicos a THD reduz para quase zero,  $\text{THD} = 1,4\%$  e  $\text{THD} = 2,2\%$  respectivamente. Como o nível

de THD teve uma redução alta a corrente do APLC também é alta, sendo o valor eficaz  $I_f = 0,029$  p.u..

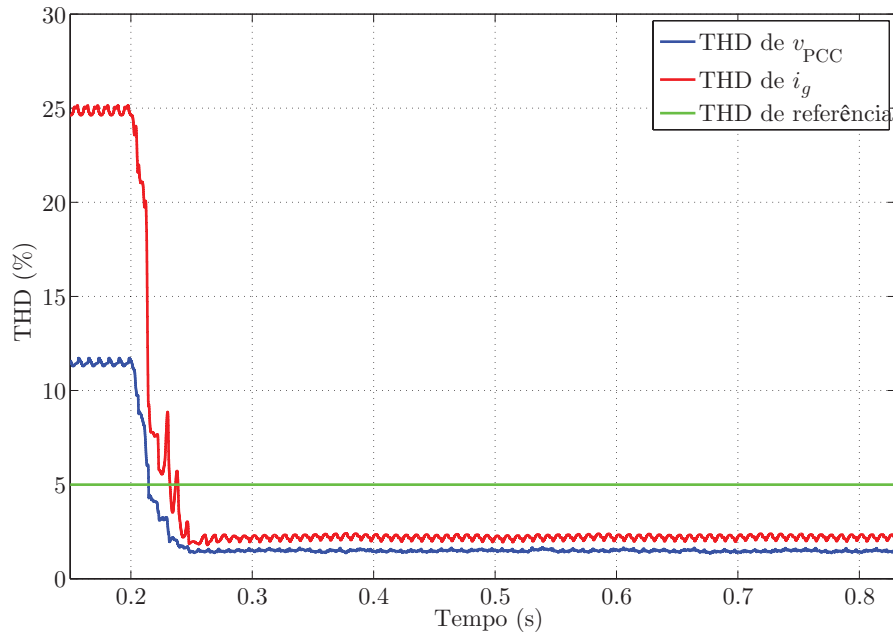


Figura 4.40: THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC por CCM da corrente da carga.

As estratégias de CCM com detecção de tensão são apresentadas nas Figuras 4.41 e 4.42. Comparando a forma da onda de tensão do PAC e da corrente do SEP depois da compensação com o resultado da Figura 4.39, observa-se que essas são mais senoidais, principalmente a forma de onda da corrente. Entretanto, a corrente injetada anteriormente foi de  $i_f = 0,029$  p.u., com a estratégia de ganho automático essa corrente foi reduzida para  $i_f = 0,018$  p.u.e com controle por decaimento para  $i_f = 0,022$  p.u.. Comparando as respostas do ganho automático e de decaimento, nota-se que a forma da corrente do SEP com controle com ganho automático permanece praticamente igual a corrente sem compensação, já a de decaimento tem melhora visível. A partir das curvas das figuras anteriores é possível calcular a THD, Figuras 4.43 e 4.44.

Para o ganho automático a redução de THD é menor que para o ganho controlado por decaimento. Essa diferença é resultante do modo como o ganho automático ajusta o ganho, incremento e decremento de variável de acordo com o nível de THD, enquanto o controle de decaimento utiliza um controlador proporcional-integral (PI) que tem regulação em regime permanente. O controle com ganho automático minimizou a distorção de tensão



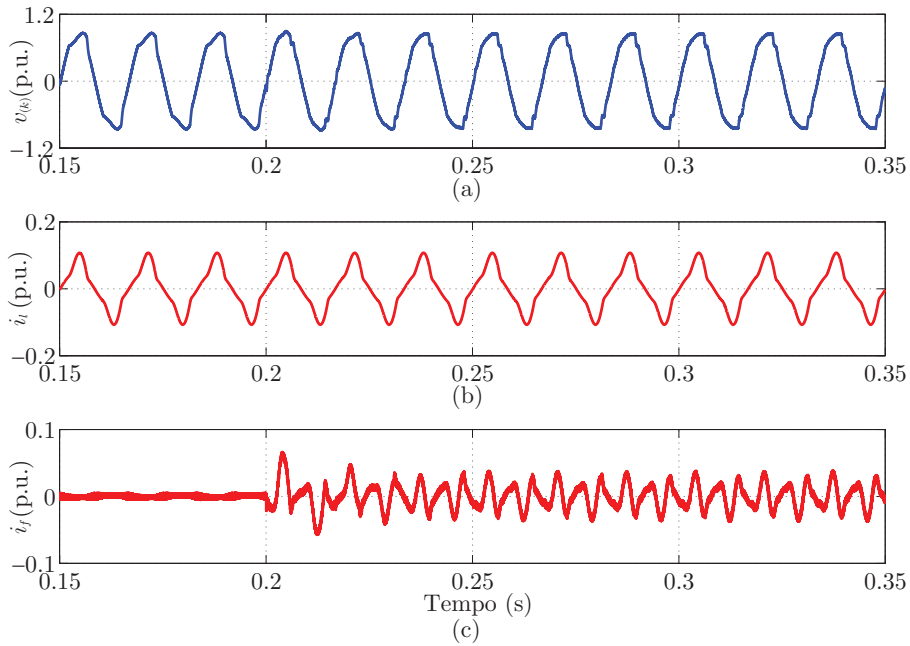


Figura 4.41: CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, variação do ganho automático (JINTAKOSONWIT et al., 2003). (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.).

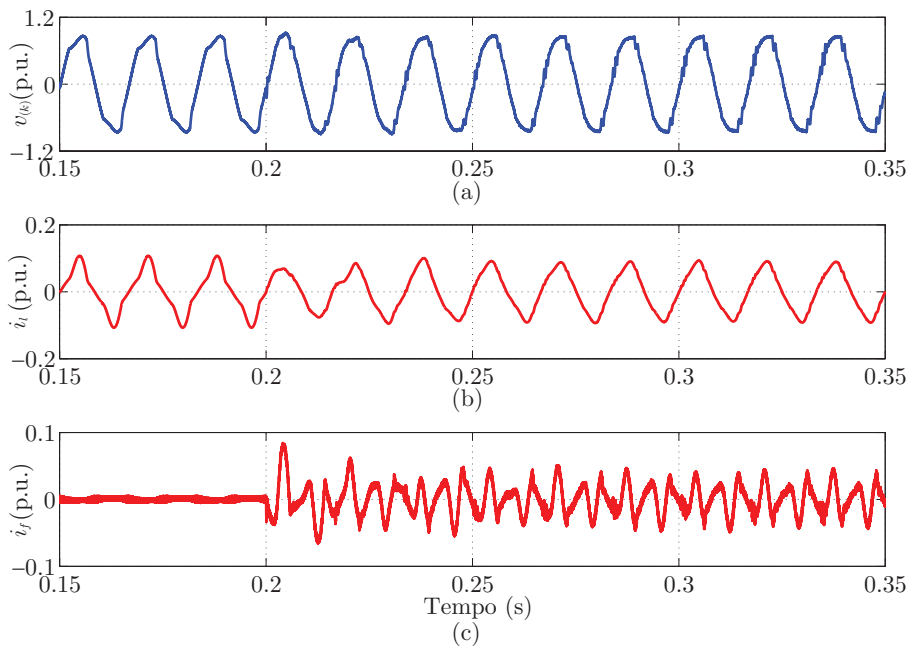


Figura 4.42: CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, variação do ganho por decaimento v. (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.).

para THD= 5% e de decaimento para THD= 4.5%. Observa-se que a THD de corrente em ambas as estratégias de CCM com detecção de tensão são elevados, entretanto, a distorção de tensão foi reduzida e satisfaz a norma com leves variações. O nível de distorção da corrente

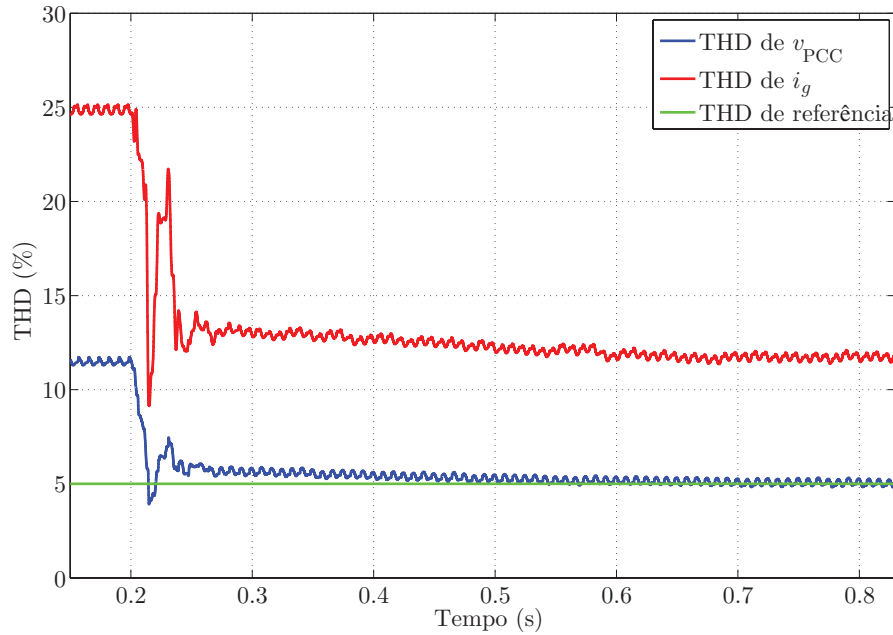


Figura 4.43: THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC com ganho automático, (JINTAKOSONWIT et al., 2003).

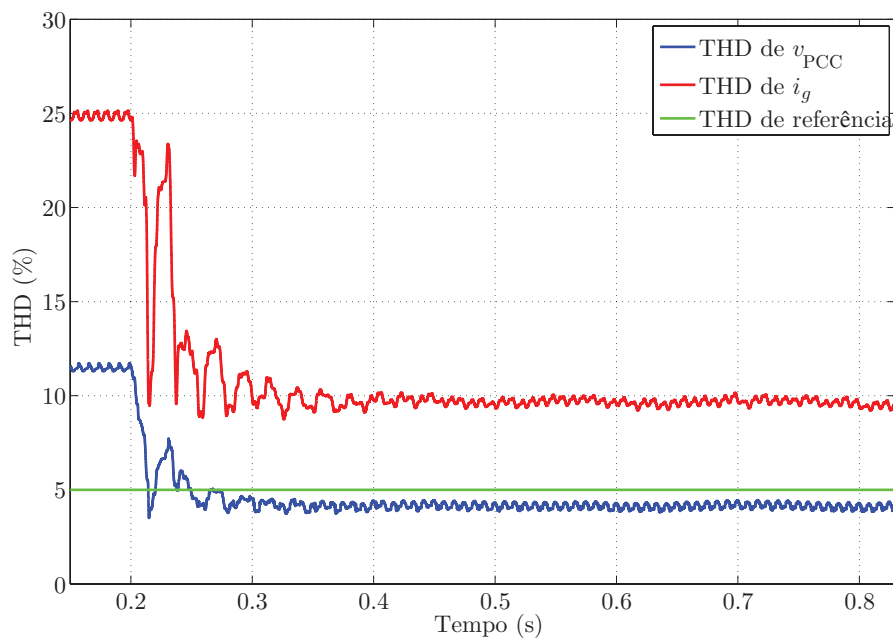


Figura 4.44: THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC com ganho por decaimento, (LEE e CHENG, 2007).

do SEP que era de 25%, com a operação da estratégia com ganho automático reduziu para THD= 13% e com decaimento para THD= 10%.

Resultados da estratégia com ajuste de ganho do controle proposto são apresentados nas

Figuras 4.45 e 4.46. Semelhante as estratégias anteriores, o nível de THD foi satisfeito. O que comprova a funcionalidade do controle. Entretanto, o controle proposto apresenta uma melhoria pelo fato de garantir também que o nível de IHD satisfaça a norma, possibilitando reduzir cada harmônico de forma independente.

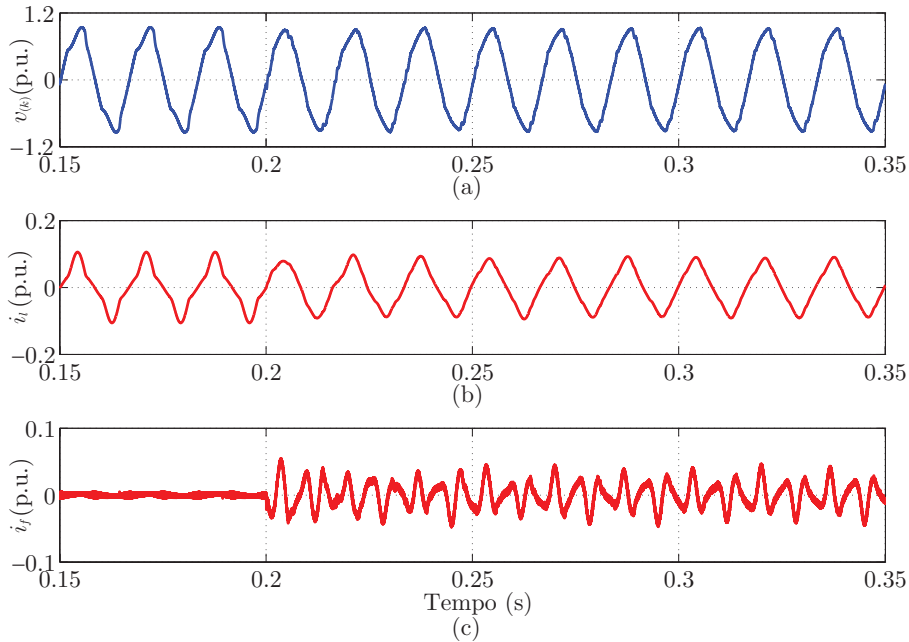


Figura 4.45: CCM com detecção pela tensão do PAC, o APLC opera minimizando harmônicos, com variação do ganho com o controle proposto. (a) Tensão no PAC (p.u.). (b) Corrente do SEP (p.u.). (c) Corrente do APLC (p.u.).

Os níveis de IHD dos principais harmônicos são apresentados na Tabela 4.4. Nas demais estratégias não há restrições quanto a IHD. Observa-se que o nível de IHD está abaixo de 3%, como regulamenta a norma IEEE-519.

Tabela 4.4: IHD com operação do controle proposto.

Ordem harmônica	$IHD_v$
3	3%
5	2,5%
7	2,0%

Um resumo da operação de cada técnica é apresentado na Tabela 4.5. Percebe-se que para o mesmo cenário, a maior redução de THD local foi apresentada pelo CCM da corrente da carga, entretanto, como foi mencionado na literatura, essa estratégia não é estável em SEP, a corrente de compensação é a mais elevada e quando a solução é avaliada globalmente

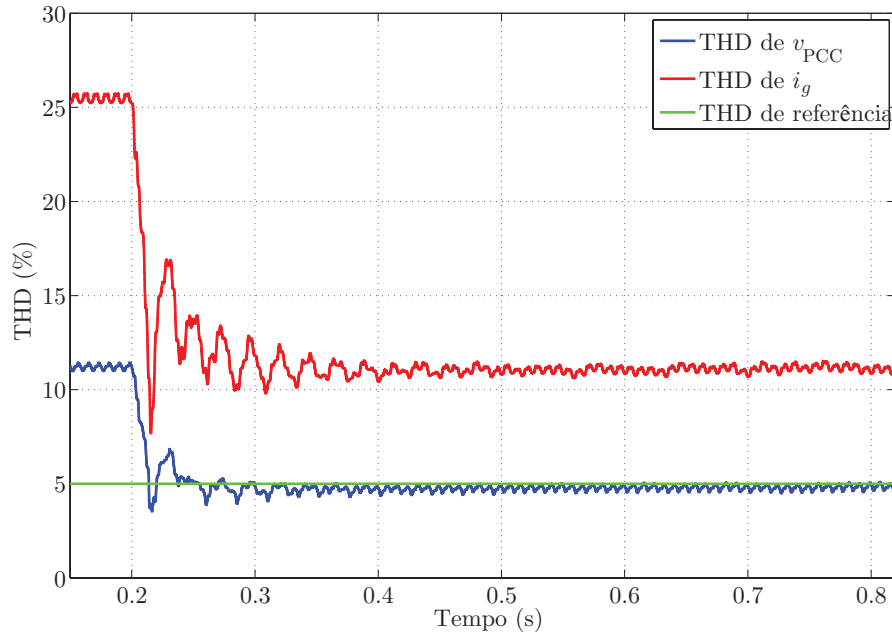


Figura 4.46: THD da tensão do PAC (em azul), da corrente da rede (em vermelho) e de referência (em verde) com e sem a compensação do APLC por CCM da tensão do PAC com variação do ganho com o controle proposto.

outros PACs podem ter o valor da THD aumentado. A operação CCM com tensão do PAC com ganho automático, apresentou a menor corrente de compensação, e apresentou resultados de regulação do nível de THD satisfatórios. A operação de decaimento apresentou corrente de compensação intermediária, mas os limites de THD foram obedecidos. O controle proposto apresentou o nível de THD que satisfaz a norma IEEE-519, e uma corrente com valor maior que as demais técnicas. Esse aumento de corrente era esperado visto que nessa estratégia, além da THD controla o nível de IHD, ( $IHD < 3\%$ ).

Tabela 4.5: Resumo da operação de APLC com CCM.

	$THD_v$	$THD_{i_g}$	$i_f$
CCM corrente da carga	1,4%	2,2%	0,029 p.u.
CCM ganho automático	5,0%	13%	0,019 p.u.
CCM ganho por decaimento	4,5%	10%	0,021 p.u.
CCM ganho proposto	5,0%	11%	0,022 p.u.

#### 4.4.4 Análise dos controladores sob falta no sistema

Em (JINTAKOSONWIT et al., 2002) o autor apresentou um controle cooperativo para evitar que em situações de falta, ou quando dois APLCs estão operando em PACs próximos,

somente um APLC seja sobrecarregado em minimizar toda a distorção harmônica, enquanto o outro fica inoperante. Para verificar o controle cooperativo proposto, nessa seção é apresentado um comparativo com os controles já publicados, ganho automático (JINTAKOSONWIT et al., 2002), ganho automático com comunicação (JINTAKOSONWIT et al., 2003), decaimento (CHENG e LEE, 2006) e o controle proposto.

A falta foi imposta no ramo 2 entre os PACs 23 e 24, sendo que o ponto 24, depois do sistema ser rearranjado, recebe alimentação do ramo 1, como ilustra a Figura 4.47. No momento que a falta ocorre, em vermelho, a chave entre o PAC 8 e 24 é fechada, rearranjando o circuito de modo que todos os PACs sejam alimentados. Com o sistema modificado, os APLCs estão instalados basicamente no mesmo ponto.

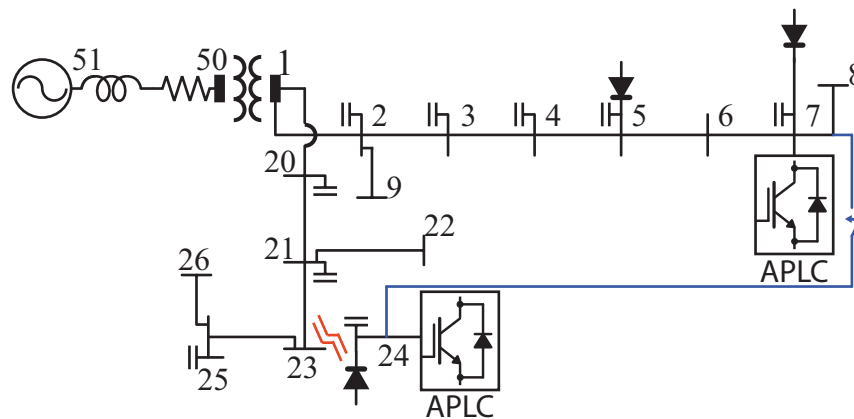


Figura 4.47: Representação simplificada sob falta entre os PACs 23 e 24.

O controle com ganho automático apresentou a resposta apresentada na Figura 4.48. A falta foi imposta  $t = 1,25s$ , antes da falta os APLCs estão operando no final dos ramos,  $m = 7$  e  $m = 24$ . As correntes não são iguais, pois estão em pontos distantes, entretanto, a THD está satisfazendo o limite ( $THD < 5\%$ ). No momento que ocorre a falta, o sistema automaticamente é modificado, e os APLCs ficam praticamente no mesmo PAC, dessa forma, é conveniente que ambos operem com a mesma potência. Contudo, como é possível visualizar, o APLC alocado no em  $m = 24$  fornece praticamente toda a potência para minimizar a distorção harmônica. O APLC instalado em  $m = 7$ , apresenta uma corrente mínima de operação. A corrente do APLC em  $m = 24$  está aproximadamente em  $i_f = 0,05$  p.u..

Para solucionar esse problema e obter potência dividida entre os dois APLCs após a falta, foi implementada uma comunicação entre os compensadores, Figura 4.49. No momento antes

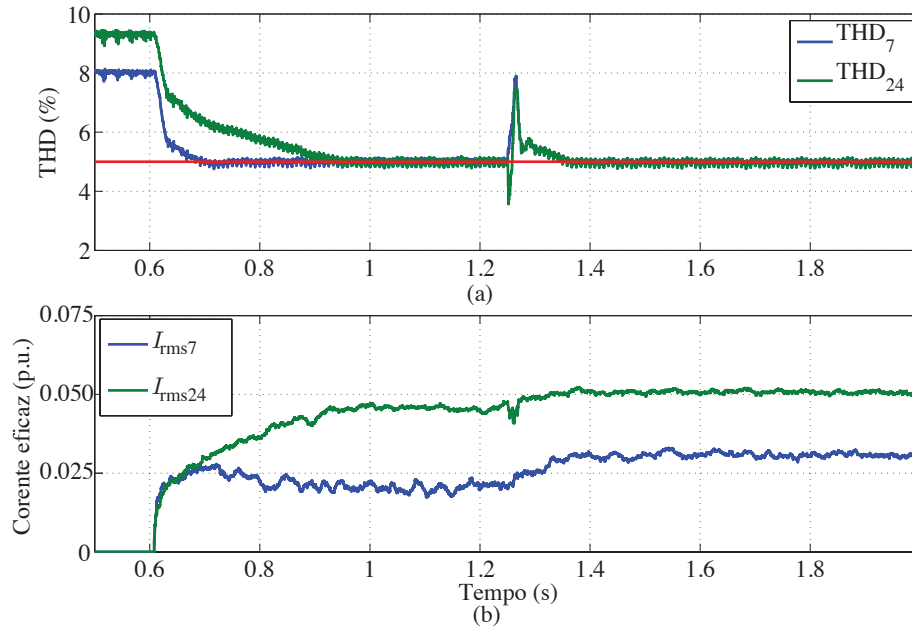


Figura 4.48: Resultados antes ( $t < 1,25$  s) e depois da falta ( $t > 1,25$  s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia sem comunicação de (JINTAKOSONWIT et al., 2002).

da falta, em ambos os PACs,  $THD < 5\%$ . As potências não são iguais, pois estão instalados em pontos diferentes, portanto, um fornece um pouco mais de potência que o outro. No momento que ocorre a falta, e ambos compensadores estão em pontos próximos, as correntes são iguais, e a distorção harmônicas também satisfaz os limites. Contudo, essa estratégia de controle é limitada por depender da comunicação entre os APLCs para operar corretamente, caso a comunicação falhe, o comportamento será igual ao apresentado na Figura 4.48, em que somente um APLC fornece potência. A corrente de ambos os APLCs é aproximadamente  $i_f = 0,035$  p.u., dessa forma, o dimensionamento da corrente das chaves do compensador é minimizado.

Uma alternativa para evitar a comunicação foi apresentada com controle de decaimento para os harmônicos, Figura 4.50. Observe que antes da falta, as correntes são diferentes, entretanto, quando a falta ocorre, imediatamente a corrente de  $m = 24$  reduz e  $m = 7$  aumenta, de forma que os APLCs dividem a potência para minimizar a distorção harmônica. Para ambos os casos  $THD < 5\%$ . Note que a corrente dos APLCs depois da falta com a estratégia de decaimento são superiores,  $i_f(rms) = 0,043$  p.u., as correntes apresentadas com o controle com comunicação.

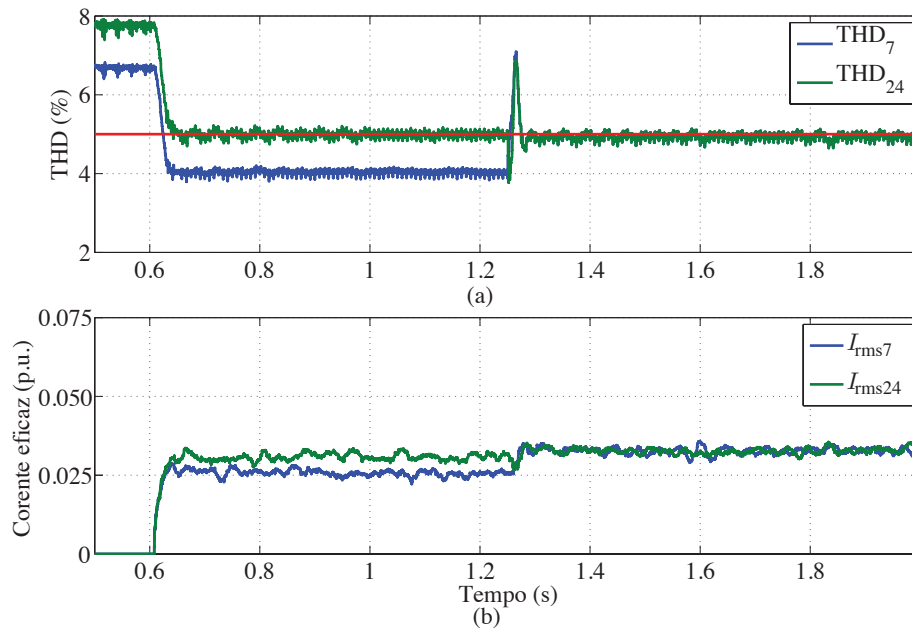


Figura 4.49: Resultados antes ( $t < 1,25$  s) e depois da falta ( $t > 1,5$  s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia com comunicação de (JINTAKOSONWIT et al., 2003).

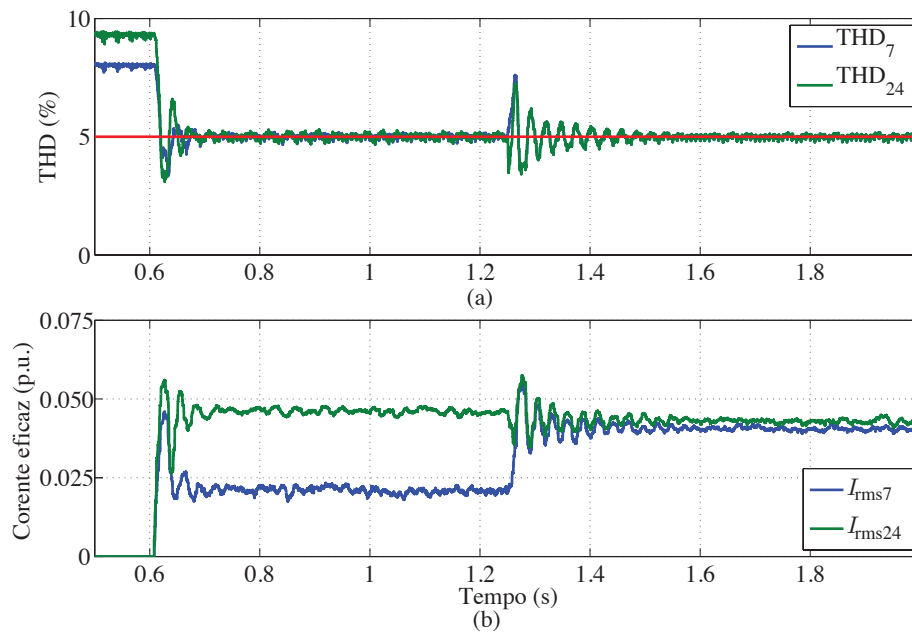


Figura 4.50: Resultados antes ( $t < 1,25$  s) e depois da falta ( $t > 1,25$  s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia sem comunicação de (LEE e CHENG, 2007).

O resultado do controle proposto sob falta é ilustrado na Figura 4.51. O controle também não possui comunicação, depois da falta, o nível de THD está abaixo dos 5%, pois além do

controle de THD, o controle proposto também tem o controle de IHD. Devido a esse controle extra, as correntes após a falta são levemente superiores,  $I_f = 0,037$  p.u., as correntes apresentadas pelo controle com comunicação, entretanto, são menores que as apresentadas no controle de decaimento.

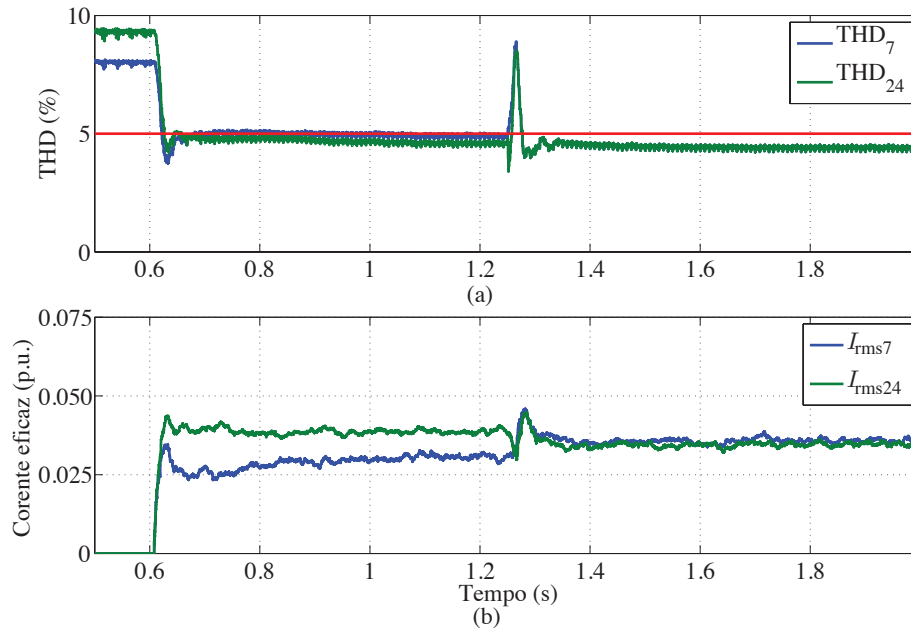


Figura 4.51: Resultados antes ( $t < 1,25$  s) e depois da falta ( $t > 1,25$  s). THD das tensões dos PACs com APLCs instalados e correntes de compensação operando com a estratégia proposta sem comunicação.

#### 4.4.5 Análise da operação local com referência fixa

O APLC atendeu as normas quando avaliado localmente, devido a isso para verificar a atuação da estrutura de forma global, é simulada a compensação analisando os PACs do SEP que não têm APLCs instalados. A variação da THD foi implementada com cargas não lineares (retificadores não controlados), sendo os valores das correntes por ordem de harmônica apresentadas na Tabela 3.1. Foram consideradas três cargas (uma em cada PAC), nos PACs 5, 7 e 24, a variação no tempo das cargas foi implementada de forma que todas as combinações fossem avaliadas em tempos aleatórios. Os APLCs foram instalados nos PACs 7 e 24, conforme estudo de localização.

O SEP com a variação das cargas, sem a operação de nenhum APLC, apresenta as curvas ilustradas na Figura 4.52, em que são apresentados os valores das THDs nos pontos de instalação do compensadores e das THDs máximas.



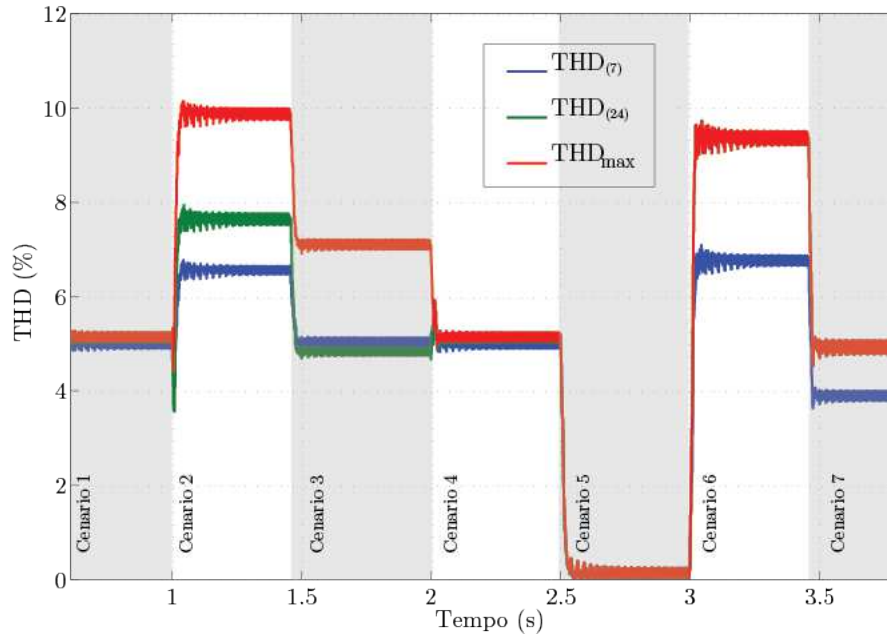


Figura 4.52: Variação da THD sem o APLC.

Analisando os resultados, é possível perceber que em alguns cenários o ponto que apresenta maior distorção harmônica não é o ponto em que os APLCs estão instalados. A maior distorção é apresentada quando todas as cargas não lineares estão operando, cenário 2. O cenário 5 não apresenta nenhuma carga não linear, sendo um ponto crítico de operação, pois os APLCs operam na referência de 5%, dessa forma podem injetar corrente para que a THD permaneça no nível de referência.

Para melhor compreensão, os valores que são obtidos sem a operação dos APLCs, para cada variação de carga, são apresentados na Tabela 4.6, descrevendo a THD de cada PAC com APLC e a THD máxima com a indicação do ponto desta distorção.

Tabela 4.6: Resultado do nível de THD e ponto com maior distorção sem a operação do APLC.

Cenário	PAC com Carga	THD <sub>(7)</sub>	<i>mTHD</i> (PAC)	THD <sub>(24)</sub>
1	24	5,1%	5,2% (24)	5,2%
2	5, 7, 24	6,6%	10,0% (22)	7,6%
3	5, 24	5,1%	7,2% (22)	4,9%
4	24	5,2%	5,2% (7)	5,2%
5	-	0,1%	0,1% (-)	0,1%
6	5, 7	6,8%	9,5% (24)	9,5%
7	5	3,9%	5,0% (24)	5,0%

Na primeira análise de compensação, utilizou-se a operação com APLC com referência

THD menor que 5% e comportamento local. Logo, são analisadas as estratégias de controle com ajuste automático do ganho, ganho com *droop* e o controle proposto.

Na Figura 4.53, são apresentados os resultados da compensação de ganho automático. Em todos os cenários, a THD no PAC de instalação dos APLCs foi compensada e seguiu a referência de 5%, apresentando operação local satisfatória. Em relação a operação global, nos cenários em que a máxima THD não é apresentada nos PACs com APLC instalado (cenários 2 e 3), os valores de distorção após a compensação permaneceram acima dos valores regulamentados,  $mTHD = 6,6\%$  no cenário 2 e  $mTHD = 5,5\%$  no cenário 3. No cenário 2, o ponto de maior THD continuou sendo o PAC  $k = 22$ , entretanto, no cenário 3, o PAC que apresentou maior distorção foi o  $k = 10$ . No cenário 6, em que o ponto com maior distorção era o  $k = 24$ , passou a ser o ponto  $k = 10$ , sendo que os limites de THD não foram satisfeitos para esse ponto ( $mTHD = 5,5\%$ ). No cenário 2, o controle apresentou problemas de regulação com leves oscilações. Nos cenários com THD abaixo do limite (cenário 5 sem cargas e cenário 7), a estratégia de ganho automático não apresentou problemas de estabilidade. O resultado em relação a variação de cargas no tempo também foi satisfatório.

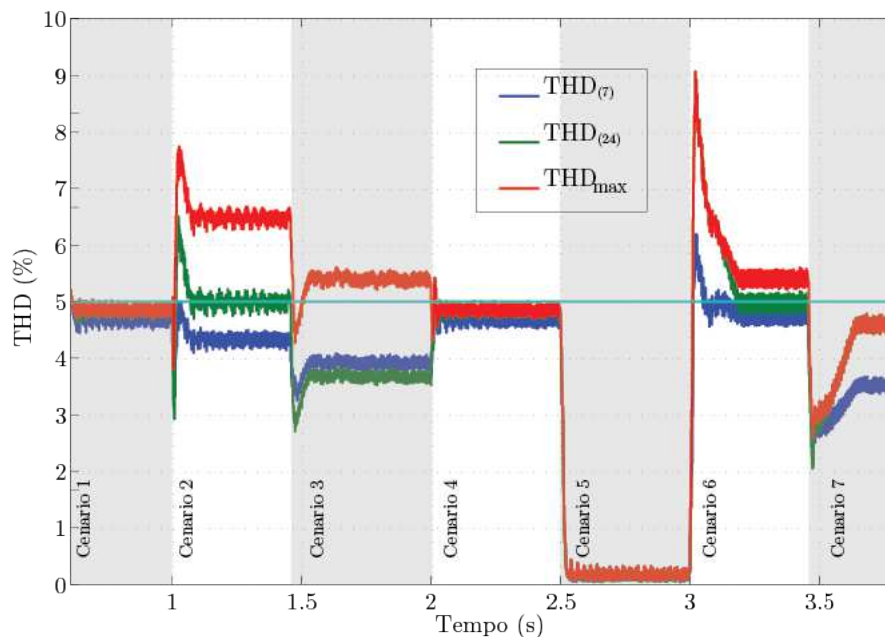


Figura 4.53: Variação da THD sem controlador supervisorío com ajuste de ganho automático.

Na Figura 4.54, as curvas de THD resultantes da compensação do APLC operando com ajuste de ganho por *droop* são ilustradas. A operação regulou o nível de THD para os PACs de instalação dos compensadores para a maioria dos cenários de forma satisfatória.

Assim como na estratégia anterior, nos cenários 2 e 3, o controle de *droop* não foi capaz de minimizar a THD para todos os pontos, em que no cenário 2, a máxima THD resultante com compensação foi de  $mTHD = 6,9\%$  em  $k = 22$  e no cenário 3,  $mTHD = 7,2\%$  em  $k = 10$ . No cenário 6, obteve-se o mesmo efeito que a estratégia anterior, compensando os pontos de instalação dos APLCs, entretanto, o ponto  $k = 10$  passou a apresentar maior THD e também não satisfaz o limite de  $5\%$  ( $mTHD = 5,5\%$ ). No cenário 3, o controle apresentou oscilações maiores que as apresentadas no cenário 2 com a estratégia de ganho automático. Nos cenários com  $THD < 5\%$ , o controle de *droop* tentou impor corrente para a THD alcançar a referência. No cenário 5 (sem cargas), a operação forçada resultou em picos de THD de aproximadamente  $45\%$ , apresentando instabilidade para esse tipo de cenário. No cenário 7, esse controle impôs corrente, e mesmo com oscilações, regulou a THD em um valor maior do que os apresentados pelas cargas não lineares, ou seja, não operou de forma ótima.

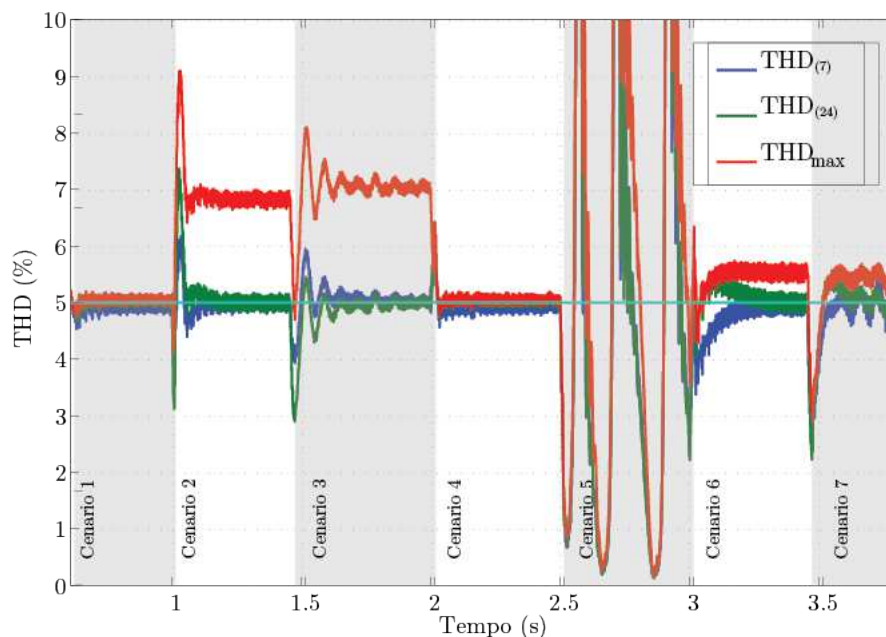


Figura 4.54: Variação da THD sem controlador supervisorío com ajuste de ganho por *droop*.

As respostas do controle proposto são ilustradas na Figura 4.55. Como nos resultados anteriores, o controle proposto aplicado de forma local também não garante que todos os PACs satisfaçam a norma IEEE-519. Entretanto, percebe-se que, devido a compensação de IHD em conjunto com a THD, é possível obter resultados mais satisfatórios, quando comparados as respostas aos mesmos cenários de outras estratégias. Assim como as estratégias anteriores que no cenário 2 apresentaram  $mTHD = 6,6\%$  e  $mTHD = 6,9\%$ , com o controle

proposto esse valor foi menor,  $mTHD = 6,1\%$ . Quando o valor da THD está abaixo de 5%, o controle proposto não impõe mais corrente para atingir a referência (de 5%), portanto, não apresenta picos de THD como a estratégia de *droop*.

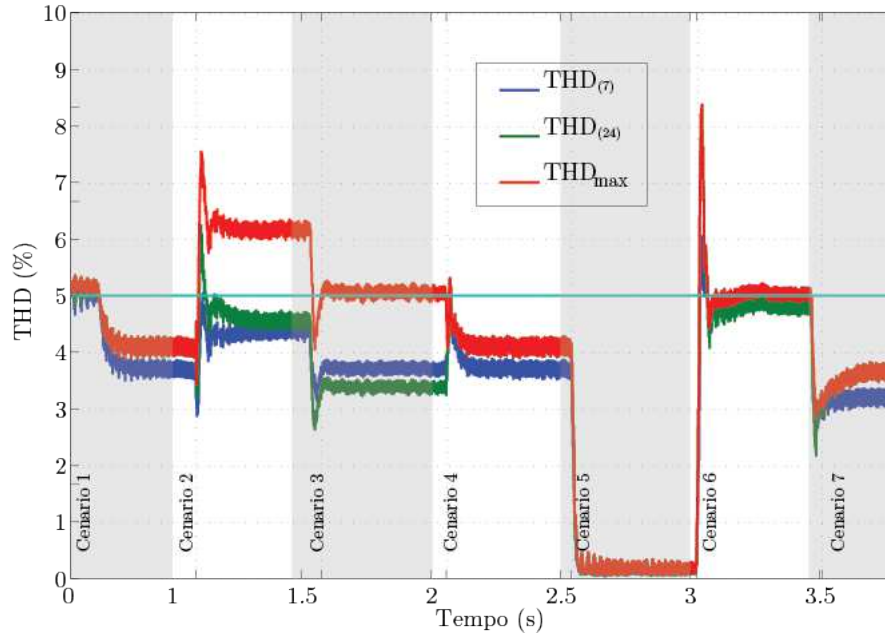


Figura 4.55: Variação da THD sem controlador supervisorio com ajuste de ganho por proposto.

A operação localizada para todas as estratégias não foi capaz de compensar globalmente a distorção harmônica de tensão. A estratégia de ajuste automático (JINTAKOSONWIT et al., 2002) e a proposta apresentaram maior estabilidade frente a variação de cargas não lineares no tempo, não apresentando problemas quando o nível de THD estava abaixo do limite estabelecido. Isso se deve a restrição da variação do ganho que foi imposta, que pode variar de 0 a 1. Nos casos que a THD está abaixo da referência, o controle reduz o valor do ganho até atingir zero. A operação com ajuste de ganho por *droop*, (LEE e CHENG, 2007), apresentou resultados semelhantes ao ganho automático para a maioria dos cenários, entretanto, quando o nível de THD está abaixo do limite impõe corrente para alcançar a referência, o que resulta em instabilidade. A instabilidade é devida a dependência que o controle apresenta em relação a potência, como ocorre uma mudança abrupta de tensão, que resulta em uma derivada elevada, dessa forma a potência tende ao infinito, resultando nos picos apresentados. A estratégia de *droop* também apresentou minimização de harmônicos global menos eficiente que a estratégia de ganho automático, pois analisando os valores de  $mTHD$  nos cenários que as normas não foram satisfeitas, o controle de *droop* resultou

em valores maiores. A estratégia proposta apresentou melhores resultados frente ao ganho automático e ao de *droop*, quando se analisa os valores de  $mTHD$  apresentados para todos os cenários, além de não ter apresentado nenhum tipo de instabilidade.

#### 4.4.6 Análise da operação com referência coordenada

Em (GEHRKE et al., 2012a), foi apresentado um controle centralizado, em que um controlador supervisor calcula, com base nas tensões dos PACs e impedâncias dos segmentos de linha, as correntes de referência para os APLCs. O resultado desse é ilustrado na Figura 4.56. Em todos os cenários o limite de THD foi satisfeito. Nota-se que em alguns cenários, o valor da THD nos PACs de instalação dos APLCs estão abaixo do limite, isso permitiu que, de forma global, em todos os pontos a distorção harmônica fossem regulados.

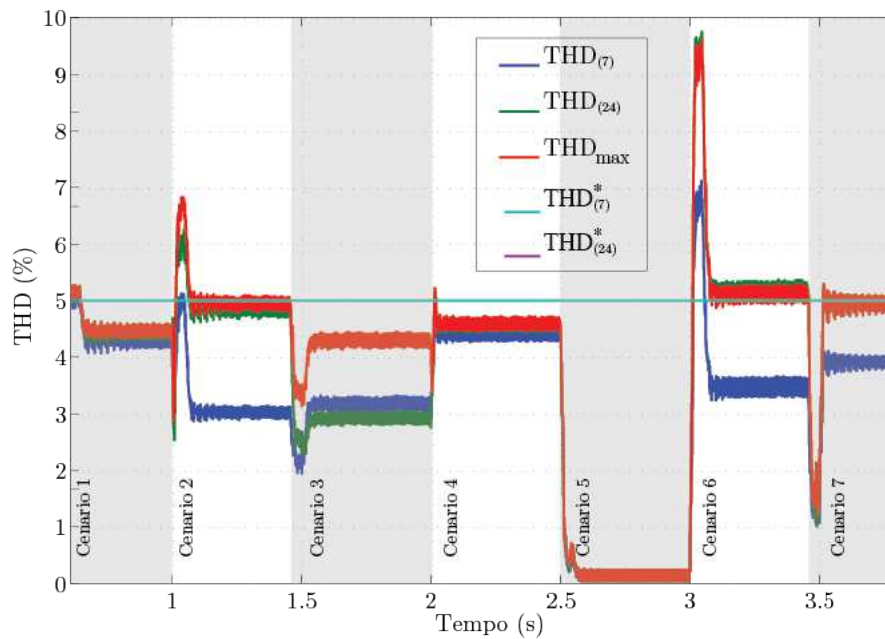


Figura 4.56: Variação da THD com controlador supervisor com controle de (GEHRKE et al., 2012a).

A partir dos dados apresentados com a operação centralizada, foi possível verificar que as referências de THD dos controles de ganho automático, de *droop* e proposto, podem ser determinadas a partir de uma coordenação. O SL adquire as tensões dos PACs, calcula os níveis de IHD e THD e envia informações de tensão para o SG caso os níveis não estejam satisfazendo as normas. Com as tensões recebidas e a partir da impedância do SEP, o SG calcula referências de THD para a operação dos APLCs para cada cenário. Dessa forma,

os controladores locais, atuam de forma local, mas compensando de forma global a rede em que estão instalados.

Na Figura 4.57, os resultados da compensação com referência de THD obtidos pelo SG e controle de ganho automático são apresentados. Para cada cenário, o SG recalculou, de acordo com os resultados apresentados, as referências de THD. Assim, foi possível reduzir a THD em todos os PACs de forma global, como no controle centralizado de (GEHRKE et al., 2012a), sendo que a única mudança do controle do APLC foi a alteração do valor da referência de THD. A estratégia seguiu a referência em todos os cenários e novamente não apresentou problemas de estabilidade frente a variação de cargas no tempo. No cenário 3, o controle de ganho automático apresentou oscilações, mas que não ultrapassaram a restrição de THD.

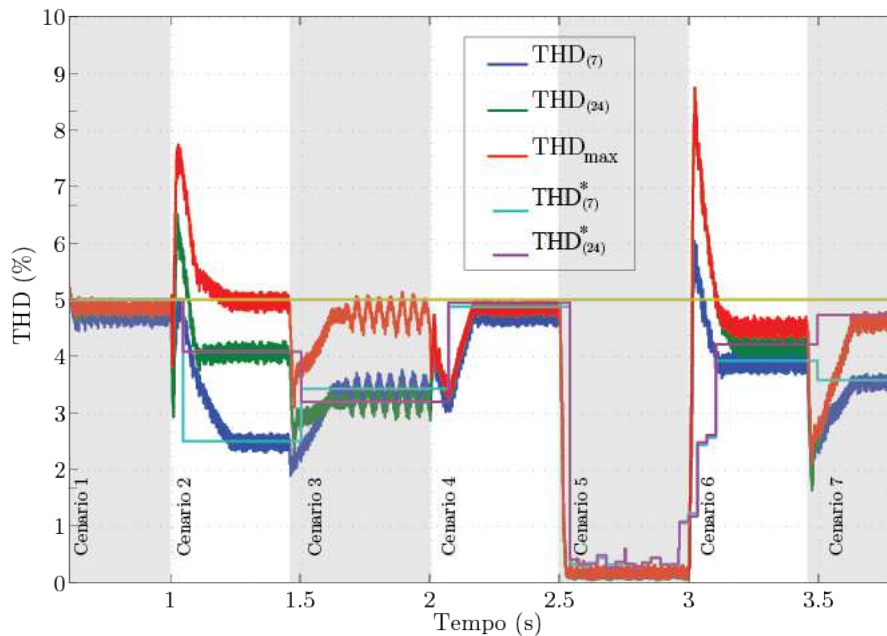


Figura 4.57: Variação da THD com controlador supervisorío com ajuste de ganho automático.

O controle com a estratégia de ganho ajustado pelo *droop* também apresentou resultados satisfatórios, Figura 4.58. O SG enviou as referências, que são recalculadas com base nos dados do SEP, e o controle de *droop* foi capaz de seguir essa referência, satisfazendo as restrições de THD de forma global. No cenário 5, em que todas as cargas foram retiradas e que a operação apresentou instabilidade atuando com referência fixa, o *droop* foi estabilizado, apresentado somente um pico. Em relação a variação abrupta de carga, esse apresentou picos um pouco mais elevados que o controle com ajuste de ganho automático, mas não apresentou

oscilações em nenhum dos cenários.

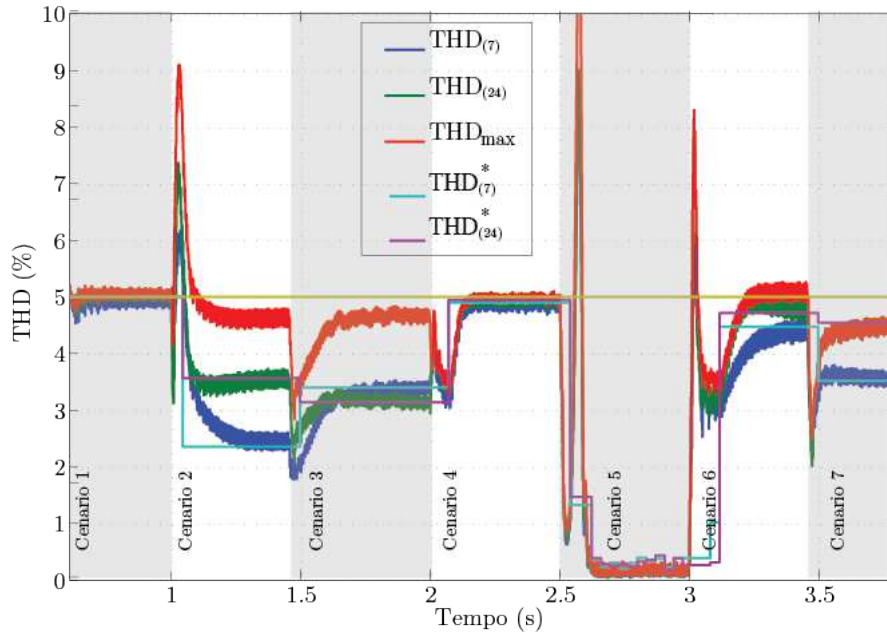


Figura 4.58: Variação da THD com controlador supervisorío com ajuste de ganho por *droop*.

Com a operação do SG, foi possível garantir THD abaixo de 5% também com os APLCs operando com o controle proposto, Figura 4.59. O controle seguiu as referências enviadas pelo SG com exceção dos cenários em que a THD apresentava valor acima do valor resultante com a regulação por IHD (somatório dos harmônicos individuais é menor que o valor de THD de referência), como são os casos dos cenários 4 e 6. O controle não apresentou instabilidade em nenhum dos cenários e os picos nas transições de cenários não foram elevados como os apresentados nas estratégias já estudadas de ganho automático e *droop*.

Analisando os cenários percebe-se que, no cenário 1 não foi preciso alterar a referência de THD. No cenário 2 foi gerado um evento  $\beta_0$ , pois a  $THD > 5\%$ , dessa forma o autômato passou do Estado 0 para 1, recebeu as tensões sem a corrente de compensação, e no Estado 2, calculou as referências de THD para os APLCs. No cenário 3, há uma variação de carga, e com a referência calculada para o cenário 2, os APLCs não estão operando com corrente ótima, portanto, um evento  $\beta_1$  é gerado, pois os SLs detectaram  $\Delta THD > 1\%$ . Após gerar o evento, o autômato para de um Estado para o outro, como já mencionado, assim recalculando as referências de THD. No cenário 4, mesmo sem compensação a THD está em 5%, portanto, o autômato gera novo evento  $\beta_1$ . No cenário 5, como a THD é nula, as referências também são quase nulas, o que melhorou o desempenho do controle de *droop*. No cenário 6, novamente

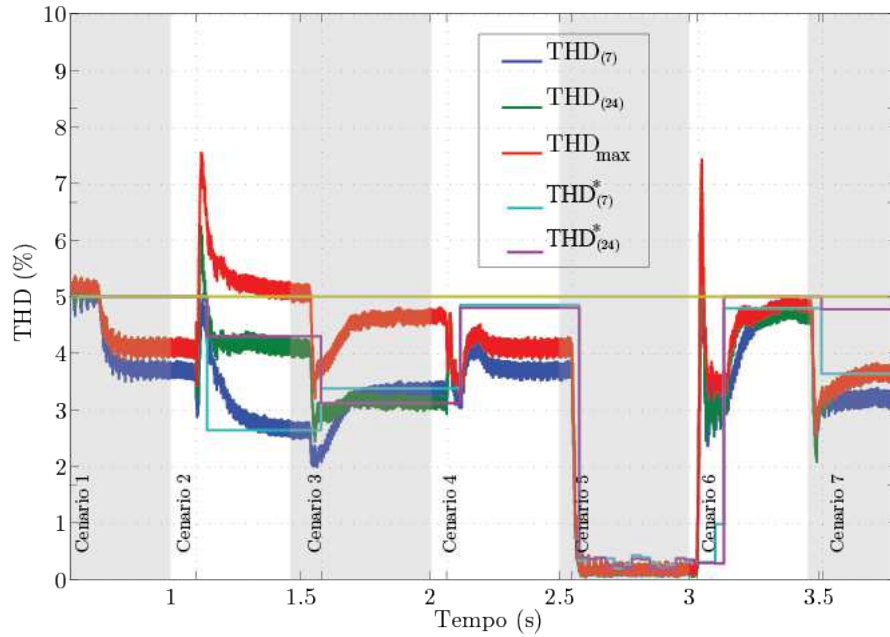


Figura 4.59: Variação da THD com controlador supervisorío com ajuste de ganho proposto.

um evento  $\beta_0$  é gerado, pois com a variação de carga THD ultrapassa os 5% e no cenário 7 é gerado um novo evento  $\beta_1$ .

Por fim, a referência da THD é recalculada toda vez que a THD está acima de 5% ou quando há uma variação na distorção harmônica, e como depende dos dados de tensão e impedância, cada controle apresenta valores diferentes, pois esses operam de formas diferentes. Em outras palavras, o SG se adequa a característica de operação local do compensador e encontra a operação ótima. A operação ótima é quando em todos os PACs a distorção harmônica é minimizada e satisfaz a norma.

## 4.5 Conclusão

A maioria das estratégias de controle de APLC são implementadas para atuar sobre uma carga e reduzir os harmônicos a zero. Para isso, essa ocupa dados locais de corrente e tensão da carga. Essa estratégia funciona bem na vizinhança local, considerando que a fonte dos harmônicos é a própria carga. Entretanto, devido ao efeito de amplificação de harmônicos, essa estratégia pode maximizar os harmônicos em locais distantes.

A grande vantagem da estratégia de minimização de harmônicos é o comportamento resistivo dos conversores de potência, o que minimiza todos os harmônicos sem problemas



de instabilidade. Como a minimização depende de uma resistência virtual, a compensação está limitada aos componentes do conversor. Outra vantagem, é em relação a custos, pois a estratégia pode ser alterada somente pelo controle do compensador.

Uma desvantagem é que a compensação de harmônicos total dificilmente é obtida. Contudo isso não é um problema, pois normas, como a IEEE-519, são aplicadas, e o controle não precisa compensar todos os harmônicos, somente limitá-los a níveis satisfatórios. Outro problema, como foi apresentado na estratégia de decaimento, é em relação aos limites do compensador, quando mau dimensionados podem sobrecarregar o APLC e conseqüentemente linhas e geradores. Esse problema não foi apresentado no controle proposto nem na estratégia de ganho automático.

O controle proposto para minimização de harmônicos apresentou versatilidade, pois não apresentou problemas com estabilidade em nenhum dos cenários testados. Foi capaz de seguir as referências impostas. Em situações de falta, e que existe proximidade entre os APLCs, o controle é capaz de dividir a potência sem a necessidade de uma comunicação física, o que aumenta a confiabilidade da estrutura.

Observou-se que a operação local garante que o nível de THD seja garantido no ponto de operação, entretanto, não é garantido para todos os PACs do SEP. Nesse sentido, o SG permitiu que os APLCs operassem de forma local com resultados que minimizaram a distorção harmônica de tensão de forma global. Para isso, esse utilizou dados de tensão e impedância para calcular as referências de THD com cargas variantes no tempo. Foi possível constatar que o estudo de alocação indicou os PACs corretos para a instalação dos APLCs. A utilização do SG para controlar a referência de THD diminui o fluxo de dados necessários e aumenta a confiabilidade do sistema, visto que se um APLC não receber mais referência de THD, esse vai continuar a operar, entretanto, não de forma global.

Definido o controle dos APLCs, esse usualmente é validado em uma plataforma experimental. Como o circuito apresentado é complexo para ser implementado em laboratório, um sistema em tempo real interagindo com o controle é estudado no próximo capítulo.

# 5

## Plataforma de testes

Trabalhos de localização na literatura, (CHANG e GRADY, 1997; KEYPOUR et al., 2004; ZIARI e JALILIAN, 2010), apresentaram resultados com SEP complexos, entretanto, os resultados foram avaliados somente por análises numéricas. Em (GEHRKE et al., 2010b; GEHRKE et al., 2010a) foram apresentados resultados de simulação, Figura 5, com vários segmentos de linha e variação dinâmica de cargas no tempo. Resultados práticos também foram avaliados, entretanto, esses foram avaliados em SEP simplificados (menos segmentos de linha e sem variação de cargas), Figura 5, devido a dificuldade de representar cenários complexos em laboratório.

De forma geral observa-se que a avaliação da localização, operação e coordenação dos APLCs interagindo com o SEP é feita em simuladores *offline* ou com cenário limitados em laboratórios, pois o teste em SEP reais não é segura antes do *software* e *hardware* do APLC serem testados exaustivamente. Entretanto, com simuladores *offline* os componentes são considerados ideais, não existe o problema de sincronização e a avaliação é feita por um tempo fixo, (QIAN et al., 2007; XIAOPIN et al., 2010; DINAVAHI et al., 2001). Os la-

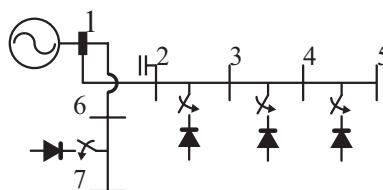


Figura 5.1: Circuito simulado.

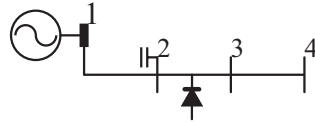


Figura 5.2: Circuito experimental.

boratórios possuem limitações físicas para representar uma rede de distribuição real (linhas com quilômetros de comprimento como as apresentadas por (CHANG e GRADY, 1997), imprevistos como faltas, ressonâncias...) o que dificulta o estudo de sintonia dos controladores.

Devido aos fatores limitantes dos simuladores *offline* e dos experimentos em laboratório, existe uma falta de validação em relação a operação com segurança e estabilidade dos APLCs distribuídos. Uma solução alternativa para a validação da localização e operação cooperativa dos APLCs são os sistemas HIL, (DING et al., 2008; XIAOPIN et al., 2010). O sistema HIL conecta um sistema real a um simulador em tempo real, que calculam as matrizes da planta em tempo real, e se o passo de cálculo é  $1 \mu s$ , significa que todas as matrizes da planta devem ser calculadas e os resultados obtidos nesse tempo. Além disso, têm portas de entradas e saídas, o que possibilita a conexão e interação com sistemas reais.

Usualmente, os sistemas HIL interagem com sistemas reais tais como plantas/processos emulados em um simulador em tempo real. A simulação de plantas/processos minimiza fatores, tais como investimento de tempo, financeiro e riscos inerentes a uma instalação física. Dessa forma, com a implementação de sistemas HIL é possível compreender melhor uma dada topologia, aperfeiçoá-la por simulação, analisar condições críticas de funcionamento e estudar associação em série ou paralelo sem os riscos e os custos inerentes a uma abordagem experimental.

A área de HIL é ampla e necessita de definições concretas dos dispositivos e controles para cada sistema. Como o HIL possui sistema real e simulado, deve-se estudar quais componentes do sistema serão simuladas em tempo real e quais serão os sistemas reais, para que se obtenha os resultados esperados e seja possível avaliar os resultados de forma a agregar mérito ao trabalho. Além disso, deve-se definir em que equipamento/dispositivo será emulado o sistema e qual será a interface para a interação entre os dois sistemas, que deve adequar os níveis de tensão e corrente do emulador ao sistema real.

## 5.1 Revisão bibliográfica de sistemas HIL

Os sistemas HIL vem sendo largamente utilizado desde a década de 90, com simuladores digitais interagindo com relés de proteção. Atualmente, começa a ser inserido no estudo de eletrônica de potência para acionamento de máquinas e controle de conversores. Usualmente, implementando o controle no sistema real, e conversor e demais dispositivos no simulador em tempo real. Em casos que um simulador digital é conectado a equipamentos/dispositivos de potência reais, tendo como interface um amplificadores de potência o sistema é conhecido como *Power Hardware-in-loop* (PHIL). O estudo de sistema PHIL, utiliza o simulador em tempo real e a eletrônica de potência, possibilitando a análise da operação do compensador e sua interação com o sistema, fornecendo bases teóricas e experimentais.

As primeiras implementações de HIL com conversor foram utilizadas para validação de acionamento de motores. (ABOURIDA et al., 2006) desenvolveu uma plataforma de testes no MatLab/Simulink contendo o inversor de frequência e o motor, sendo o controle realizado no RT-LAB (plataforma baseada em um computador, atualmente o programa foi incorporado no OPAL-RT), Figura 5.3. A plataforma tem o objetivo de avaliar os *drives* de motores e controles implementados neste. Os dados fornecidos pelo MATLAB são as correntes do inversor,  $i_i$ , e a frequência do motor,  $\omega$ . A partir desses dados o controle é realizado na plataforma RT-LAB, onde a PWM seja gerada. O PWM gerado é enviado na forma de pulsos,  $q$ , para o MATLAB fechando o HIL. Ao analisar os resultados obtidos, o autor comenta, que há restrição de passo de cálculo, que é limitada pelo computador utilizado pelo RT-LAB. O passo de cálculo utilizado foi de  $25 \mu s$ , o que limitou a velocidade do motor simulado. Observa-se que o autor utilizou duas plataformas de simulação conectadas através de sinais digitais.

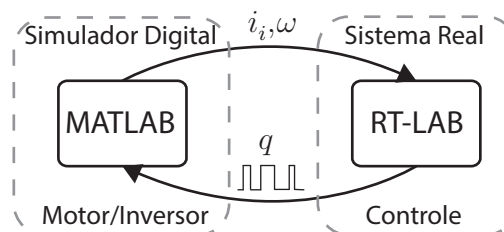


Figura 5.3: HIL com controle no RT-LAB e simulação do inversor e motor no MATLAB.

No mesmo ano, (SURYANARAYANAN et al., 2006), com o objetivo de estudar DG,

implementou geradores distribuídos em uma rede de distribuição, Figura 5.4. A rede, o inversor e o gerador foram implementados no simulador digital de tempo real (*Real-Time Digital Simulator*) (RTDS<sup>®</sup>) e o controle foi implementado no MATLAB/Simulink utilizando a ferramenta de tempo real (*Real-Time Workshop*) (RTW). O conceito foi elaborado para que as normas IEEE-1547 fossem estudadas, bem como, para a análise do impacto da interconexão de DGs. A plataforma opera enviando os sinais da tensão da rede,  $V$ , a tensão do barramento CC,  $V_{dc}$  e a tensão no PAC do gerador distribuído,  $v_{DG}$ , a partir desses dados o controlador implementado no MATLAB calcula o PWM e envia os pulsos,  $q$ , para o RTDS<sup>®</sup>. O autor ressaltou que plataformas HIL favorecem na possibilidade de incluir em um mesmo *loop*, *hardware* reais para simular em tempo real com eventos do SEP.

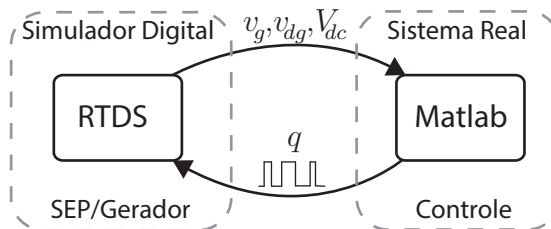


Figura 5.4: HIL com DG e SEP emulados no RTDS<sup>®</sup> e controle no MATLAB.

Um conceito diferente foi proposto por (STEURER et al., 2007), o autor propôs um sistema de potência no RTDS<sup>®</sup> e acoplou, através de um amplificador de potência, um inversor e um gerador. Essa configuração é conhecida como PHIL. O amplificador de potência utilizado é basicamente uma fonte variável de tensão. O autor salienta que a idéia foi desenvolvida visando avaliar a integração de dispositivos de potência reais no SEP, entretanto, não apresentou resultados.

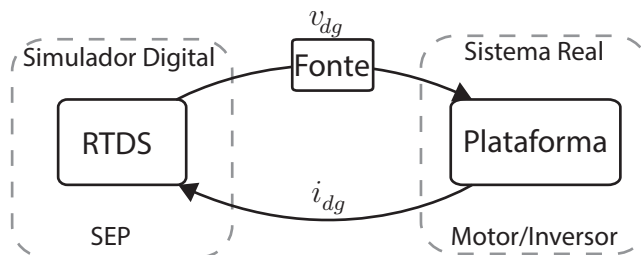


Figura 5.5: Primeiro PHIL proposto, utilizando o RTDS<sup>®</sup> para emular o SEP e uma plataforma real com inversor e motor.

Em (QIAN et al., 2007) o autor implementou uma plataforma HIL flexível com objetivos educacionais. As plataformas são: 1) inversor e motor; 2) conversor *back-to-back* e motor, e

3) carga não linear controlada por tiristores. Por apresentar carga não linear e conversores controláveis, o sistema pode ser utilizado para o estudo de compensação de harmônicos, caracterizando portanto, o primeiro trabalho com APLCs em sistemas HIL. O controle dos conversores foi implementado no dSPACE como interface entre sistema real e simulador digital, Figura 5.6. Foram propostos dois testes, 1) RTDS + dSPACE e 2) dSPACE + sistema real.

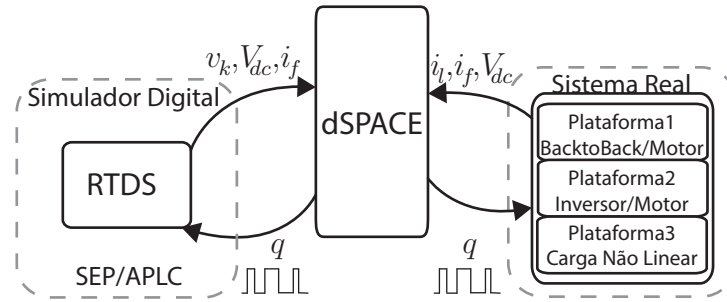


Figura 5.6: Plataforma flexível, permitindo diferentes conexões entre, controlador (dSPACE), sistema real (inversores e cargas) e emulação em tempo real (RTDS®).

Os resultados do teste 1 foram obtidos utilizando o RTDS® para emular o SEP e o APLC, e enviar os dados de tensão do barramento,  $V_{dc}$ , corrente do APLC,  $i_f$  e tensão do PAC,  $v_k$ , em que  $k$  representa o número do PAC em que o APLC está conectado. O controle foi desenvolvido no dSPACE, que envia para o RTDS os pulsos,  $q$ . Resultados da resposta da tensão do barramento e da potência reativa foram apresentados.

No teste 2, foi proposto o controle no dSPACE, que enviaria os pulsos  $q$ , para inversores reais controlarem os harmônicos da carga não linear. Entretanto, foi apresentado somente o resultado de estimação de harmônicos da corrente da carga,  $I_l$ . No dSPACE foi implementado o estimador e o sistema real somente envia a corrente da carga.

Em (DING et al., 2008) também foi proposto um PHIL para uma maior aproximação com o sistema real, em que um APLC foi conectado ao RTDS®, Figura 5.7. A interface foi implementada para um controle em malha fechada considerando as características de entradas e saídas do RTDS®. O PHIL é composto por um IPM200DSA120 como fonte de tensão, e o controle foi realizado com dois *Digital signal processings* (DSPs), como parte alta e baixa de uma estrutura de computador. Na prática, o RTDS® gera a corrente da carga,  $I_l$  e a tensão da carga,  $v_l$  e envia para o amplificador de potência. Esses sinais são recebidos e condicionados pelo APLC. Com esses dados, o controle gera a corrente de compensação,

$i_f$ . O autor propôs que essa corrente gerada pelo APLC, fechasse o PHIL com o RTDS<sup>®</sup>, entretanto o *loop* não foi fechado. Os resultados apresentados são a soma das correntes de compensação e da corrente da carga. O que pode indicar problemas de *delay* e sincronismo entre RTDS<sup>®</sup> e APLC.

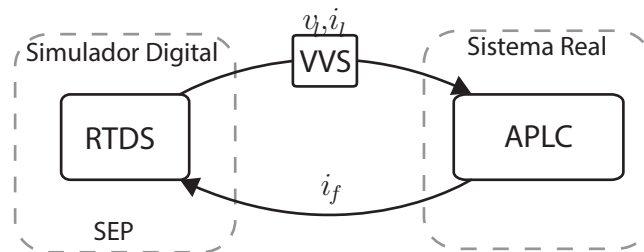


Figura 5.7: PHIL proposto para a aplicação em compensação de harmônicos.

Seguindo no âmbito de APLCs, (XIAOPIN et al., 2010) desenvolveu um controle de um APLC em um *Field-programmable gate array* (FPGA) em conjunto com um DSP, Figura 5.8. As chaves do compensador foram simuladas no próprio RTDS<sup>®</sup> eliminando a necessidade de implementação do APLC. Nessa solução, a validação do APLC se restringe ao estudo das malhas de controle. O RTDS<sup>®</sup> envia a corrente da carga,  $I_l$  e o controle do APLC calcula os pulsos  $q$ , para controlar o compensador. O autor apresenta resultados com conexão direta entre APLC e RTDS<sup>®</sup> e detecta que há *delays* na corrente de compensação  $i_f$ , e na corrente de referência  $i_f^*$ , Figura 5.9. Apresentou como solução a inclusão de um compensador em avanço, o que solucionou o problema.

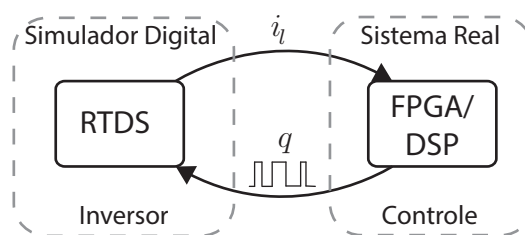


Figura 5.8: HIL com controle de um APLC em DSP e emulação do compensador e rede no RTDS<sup>®</sup>. Fonte:(XIAOPIN et al., 2010).

Em (JAVADI et al., 2010) também foi implementado um HIL utilizando APLC. Sendo que o controle foi implementado no simulador digital OPAL-RT a carga e o APLC são reais. O OPAL recebe os sinais de corrente da carga para gerar a referências da corrente do APLC. A partir das referências envia os pulsos,  $q$  para comandar as chaves e assim compensar os harmônicos. Entretanto o autor salienta que esse tipo de configuração não permite que a

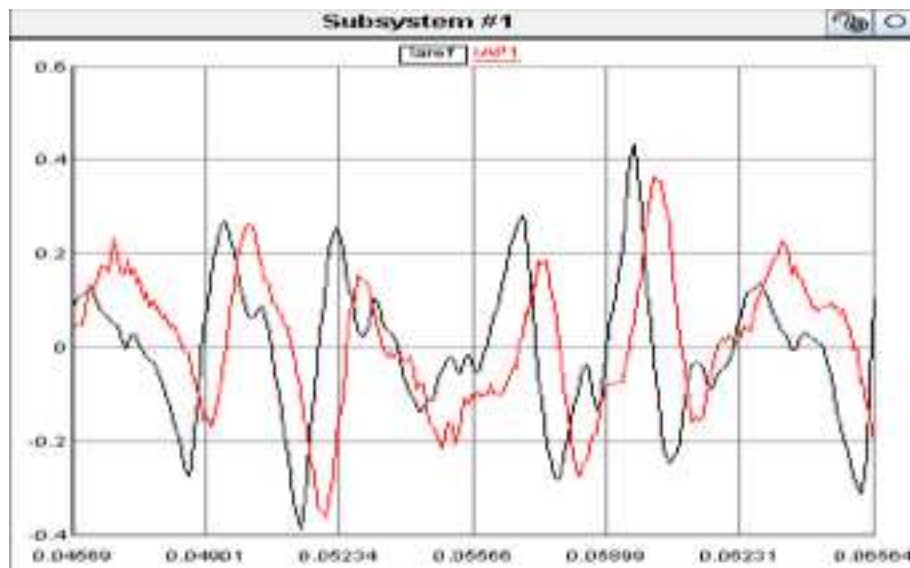


Figura 5.9: *Delay* apresentado no HIL entre corrente de referência,  $i_f^*$  e corrente de compensação,  $i_f$ .

corrente seja com forma perfeita, pois o passo de cálculo utilizado, e permitido pelo OPAL é de  $10 \mu s$ . Também utilizando o OPAL como controlador, (FILHO et al., 2010), implementou um inversor alimentado com fotovoltaico (*Photovoltaic*s) (PVs) para conexão com a rede. O controle no OPAL, detecta o rastreamento do ponto de potência máxima (*Maximum Power Point Tracking*) (MPPT), gera uma referência de ângulo utilizando um *Phase-Locked Loop* (PLL) e a partir dessas referências gera o PWM e envia os pulsos,  $q$  para o inversor. Ambos utilizaram a topologia apresentada na Figura 5.10. Para (JAVADI et al., 2010) o inversor representa o APLC e para (FILHO et al., 2010) representa o conversor de controle do PV.

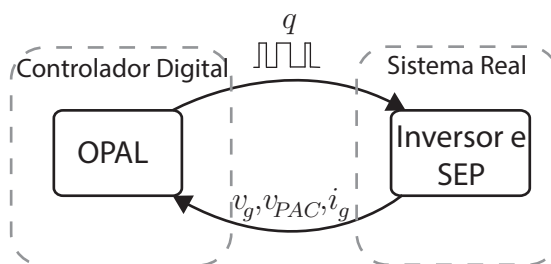


Figura 5.10: Diagrama da estrutura inversor/controlador que utiliza o OPAL-RT como controlador.

Em (DINAVAHÍ et al., 2001) o autor estudou a interação entre o sistema real e o simulador digital. Nos trabalhos apresentados, percebe-se que a maioria deles implementa o controle no sistema real, o qual controla as chaves no simulador digital. Como as saídas do



controle são digitais pode ocorrer problemas de sincronismo entre os sistemas, Figura 5.11. O autor, portanto, propôs um algoritmo com interpolação e um passo de cálculo variável para uma melhor representação dos eventos de chaveamento, minimizando erro por sincronismo.

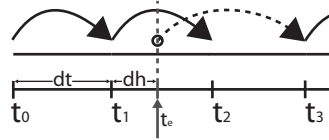


Figura 5.11: Problemas de sincronismo no chaveamento digital.

## 5.2 Objetivos

Diferentes topologias de sistemas HIL e PHIL foram apresentadas, em que foram detectados problemas tais como: limitação de passo de cálculo, *delays* e sincronismo. No sentido de contribuir na discussão de soluções que permitam equacionar as dificuldades anteriormente salientadas, no que tange ao estudo de APLCs distribuídos e operando de forma cooperativa, conectados em um SEP, neste capítulo é apresentada a implementação de um HIL. De acordo com o apresentado, propõem-se que o OPAL-RT emule os ramos da rede de distribuição, APLC e cargas, e que o controle do APLC seja implementado em um DSP. O sistema proposto é ilustrado na Figura 5.2.

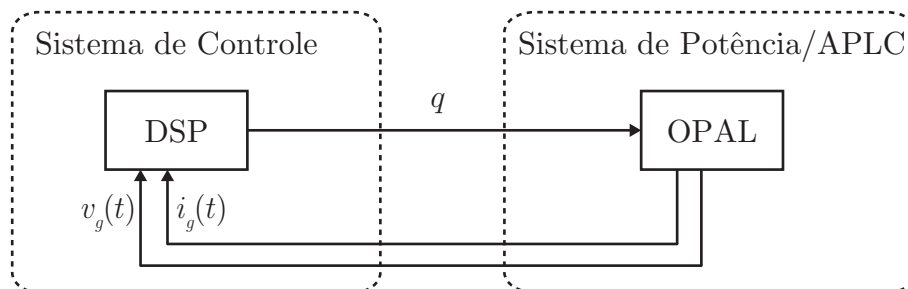


Figura 5.12: Sistema proposto do HIL.

## 5.3 Sistema HIL

Os sistemas HIL integram simuladores e equipamentos reais, dessa forma possibilitam compreender melhor um dado sistema de controle, aperfeiçoar sintonia e analisar condições críticas de funcionamento sem os riscos e os custos inerentes a uma abordagem experimental. Para controladores de APLCs, o HIL permite avaliar a resposta frente a distúrbios de qualidade da tensão, tais como afundamentos, elevações, harmônicos, impulsos, transitórios, cilintilações, desbalanços e interrupções. Como esses distúrbios não podem ser testadas em SEP reais, uma solução é emulá-los em simuladores *online*. O foco deste trabalho é a avaliação da sintonia dos controladores dos APLC frente a distúrbios, a dinâmica de acordo com o PAC em que foi instalado e a interação entre as unidades, para essa avaliação será implementado um sistema HIL descrito na Figura 5.13. Como o HIL é composto de duas partes, controle do APLCs, que é implementado em um DSP; e sinais de tensão e corrente, gerados pelo simulador *online*, no primeiro momento serão estudadas as interfaces para conexão dessas, e em seguida são descritos o circuito emulado em tempo real e o controle implementado no DSP, (GEHRKE et al., 2012c; GEHRKE et al., 2013) .



Figura 5.13: Circuito simplificado para representar a implementação do SEP e conversor no OPAL interagindo com os DSPs.

### 5.3.1 Interfaces de conexão

Devido a faixa de operação da tensão nos pinos de ambos dispositivos, a conexão do OPAL com o DSP é de fácil implementação. O OPAL opera em uma faixa de  $\pm 15$  V, o qual pode ser condicionado via *software* para adequar a faixa de operação do DSP 0 a 3,3 V, Figura 5.14. Os sinais de saída do DSP não precisam de nenhum tipo de condicionamento,

já que os mesmos são pulsos, e o OPAL é capaz de detectar (nível alto e nível baixo) para comando das chaves do APLC. Vale destacar que, o passo de cálculo da simulação do APLC é de  $20 \mu s$ , possibilitando a leitura dos pulsos enviados pelo DSP que apresentam um período de  $100 \mu s$  (10 kHz). O OPAL também tem um módulo de detecção de eventos, dessa forma, é possível detectar pulsos que ocorram em períodos menores que o passo de cálculo de emulação do sistema de potência, Figura 5.14. Dessa forma, o problema descrito por (DINAVAHÍ et al., 2001) não afetam essa plataforma.

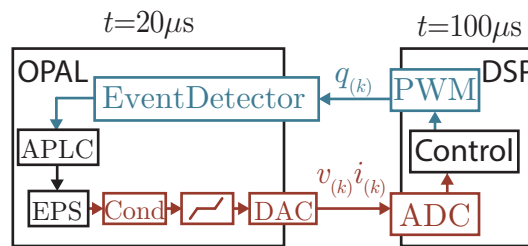


Figura 5.14: Interfaces entre DSP e OPAL.

### 5.3.2 Circuito emulado no OPAL

O SEP implementado no OPAL foi ilustrado na Figura 4.21, sendo o mesmo circuito que foi utilizado pelas análises em simulação. Para exemplificar a implementação no OPAL, o circuito simplificado é ilustrado na Figura 5.15. As cargas podem ser conectadas e desconectadas em tempo real, variando a potência de zero ao valor nominal, a partir do ganho,  $a$ , que multiplica o valor das fontes de corrente,  $I_l$ . Os valores das correntes foram dados na Tabela 3.1. Desta forma, os níveis de THD variam de acordo com a combinação de cargas selecionadas. Os valores das tensões dos PACs,  $v_{(k)}$ , em que os APLCs estão conectados, são condicionadas de p.u. para os níveis de tensão de operação do DSP, limitados e enviados para um conversor digital-analógico (*Digital-Analogic Converter*) (DAC). Os sinais analógicos gerados podem ser lidos pelos DSPs, sendo que em cada PAC que um APLC foi instalado, existe um DSP de controle. A corrente do APLC é gerada a partir de um conversor emulado no OPAL, no qual as chaves são comandadas por pulsos  $q(m)$  por modulação PWM, os quais são gerados externamente ao OPAL pelo DSP. A corrente gerada, é então somada ao circuito, para que os níveis de distorção harmônica sejam regulados e satisfaçam as normas. Como o controle de corrente foi implementado em malha fechada, as correntes geradas pelo conversor,  $i_{f(m)}$ , assim como as tensões, são condicionadas, limitadas e enviadas

para um DAC, para que sejam lidas pelos DSPs.

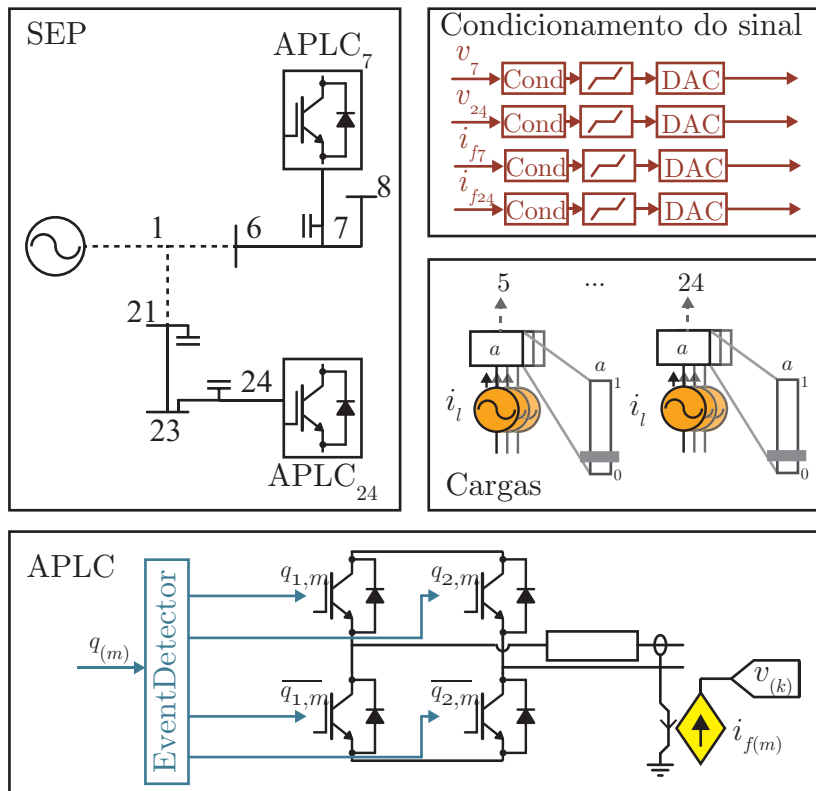


Figura 5.15: Circuito emulador no simulador em tempo real. O SEP é o mesmo utilizado para as simulações, o APLC são conversores controlados por PWM, que são gerados pelo DSP e recebidos pelo EventDetector. As cargas são conectadas nos PCCs 5, 7 e 24, e podem variar a potência por um ganho  $a$  de 0 a 1. O condicionamento amplifica o sinal em p.u. para os níveis de operação do DSP.

### 5.3.3 Controle implementado no DSP

A malha de controle foi implementada no DSP conforme a Figura 4.11. Os sinais analógicos de tensão da rede são recebidos do DAC, convertidos pelo ADC do DSP e armazenados. A tensão  $v_k$  é transformada para o domínio da frequência utilizando o RTHDM, para obter um vetor de tensões  $v_{(h)}$ , em que  $h = [5, 7, 11, 13]$ . A partir dos dados dos harmônicos, a IHD e a THD são calculadas pelas Equações 2.18 e 2.19. Entretanto, para minimizar a complexidade do programa, o valor da referência da THD é elevado ao quadrado, e assim, a raiz quadrada da equação pode ser omitida. Obtidos os dados, é possível aplicar a malha de controle proposta na Figura 4.11, e, seguidamente, calcular a corrente de referência,  $i_f^*$ . Essa corrente de referência é aplicada a um controlador  $R_i$  e comparada a um sinal triangular simétrico de 10 kHz, que gera os pulsos de comando,  $q$ , para o APLC.

### 5.3.4 Resultados

O cenário apresenta cargas em 5, 7 e 24 com 80% da potência harmônica, conforme descrito na Tabela 3.1. Esse cenário apresenta THD acima de 5% nos PCC 7 e 24, conforme Figuras 5.16 e 5.17. Com a operação dos DSPs a THD reduziu e satisfaz o limite regulamento pela norma, Figuras 5.16 e 5.17. Percebe-se que as interfaces foram suficientes para que o HIL funcionasse corretamente, pequenos desvios que podem ocorrer devido ao passo de cálculo foram contornados pelo método de integração do OPAL e pela forma de operação do controle implementado. Observa-se, que foi possível minimizar os harmônicos de forma cooperativa sem nenhuma comunicação entre os DSPs.

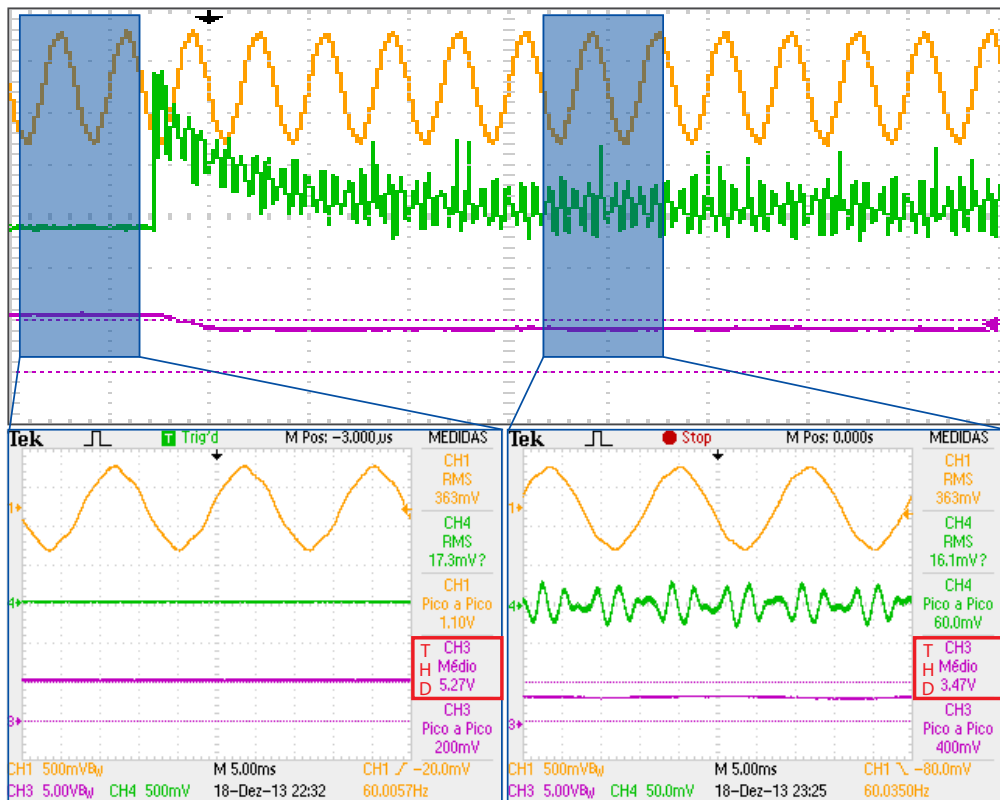


Figura 5.16: Tensão,  $v_7$ , (CH1-amarelo): 500 mV/div; a corrente do APLC,  $i_{f7}$ , (Corrente (CH2-verde): 50 mV/div; e a THD, (CH3-rosa): 5V/div; Tempo: 10ms/div). a) Transitório da operação do APLC, b) Antes da compensação e c) depois da compensação.

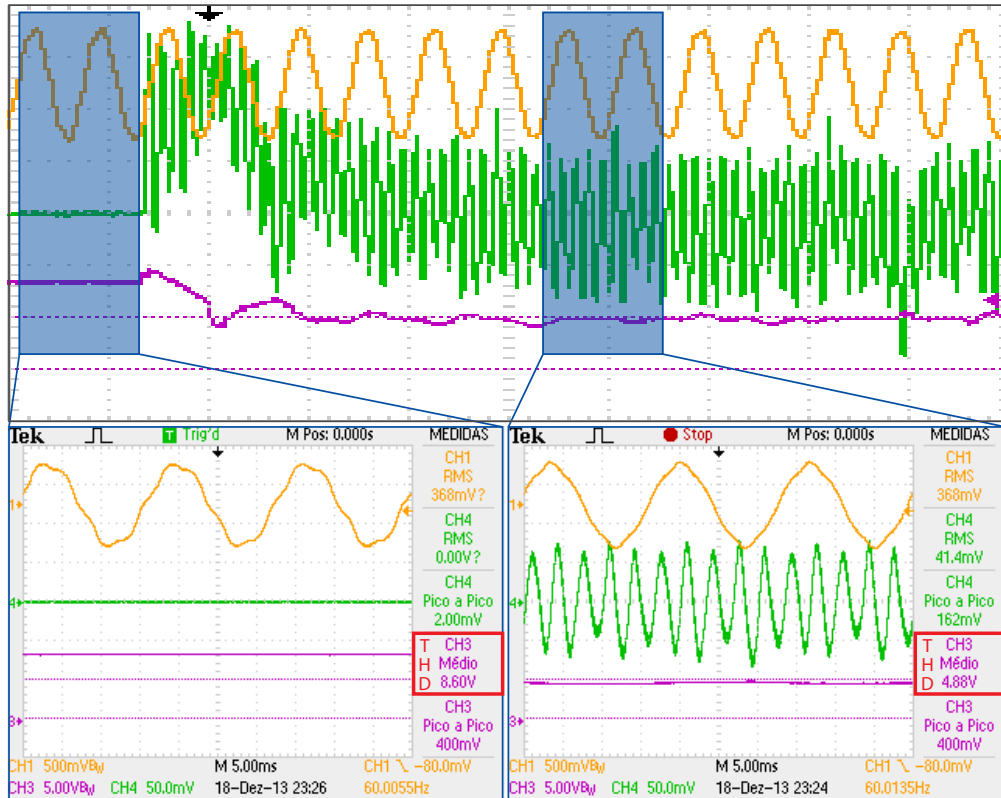


Figura 5.17: Tensão,  $v_{24}$ , (CH1-amarelo): 500 mV/div; a corrente do APLC,  $i_{f_{24}}$ , (Corrente (CH2-verde): 50 mV/div; e a THD, (CH3-rosa): 5V/div; Tempo: 10ms/div). a) Transitório da operação do APLC, b) Antes da compensação e c) depois da compensação.

## 5.4 Conclusão

Com sistema HIL implementado foi possível analisar o efeito dos APLCs em SEP. Primeiro pode ser analisada a dinâmica do APLC no PAC de instalação, observa-se que a corrente é estabilizada em aproximadamente 7,5 ms em  $k=7$  e 5 ms em  $k=24$ . Com a estabilização da corrente, a THD atinge o valor do limite estipulado pela norma de  $THD=5\%$ . A minimização de harmônicos de tensão pode ser observado tanto pelo nível de THD como pela forma de onda da tensão, que antes da compensação estava bem mais distorcida que depois da compensação. A maior mudança pode ser observada em  $k=24$ , pois antes da compensação a  $THD=8,6\%$ , e depois da compensação esse valor foi reduzido para  $THD=4,8\%$ . Devido a uma maior redução de THD no PAC 24 a corrente de compensação do APLC instalado nesse ponto apresenta maiores amplitudes harmônicas, resultando em uma corrente eficaz de  $I_{rms}=0,041$  p.u., enquanto no PAC 7,  $I_{rms}=0,016$  p.u..

A partir desses resultados foi possível verificar que a localização e dimensionamento foram satisfatórios, visto que a corrente necessária não ultrapassou a corrente máxima do dimensionamento. Também foi possível verificar que a planta de controle demonstra o comportamento adequado do sistema, e que a análise de sensibilidade é compatível com a dinâmica do sistema, visto que o PCC 24 apresentou maior sensibilidade quando comparado com o PCC 7.

# 6

## Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Nesse trabalho foi apresentado um algoritmo para localização e dimensionamento ótimo de APLCs em um SEP. A área de localização é muito vasta e vem ganhando grande destaque para estudo, devido ao aumento de cargas não lineares no sistema, assim como de normas regulamentadoras para níveis de distorções harmônicas de tensão. Além da localização, foi desenvolvido um controle para controlar os APLCs.

Quanto a localização e dimensionamento, a solução de múltiplos cenários avaliou que com qualquer combinação de carga que a rede de distribuição apresente, a localização ótima consegue encontrar minimizar os níveis de distorção harmônica. Também foi possível verificar que o ponto de instalação dos filtros, não é o mesmo ponto de acoplamento em que as cargas estão instaladas. Observou-se que, o ponto ótimo de instalação do filtro normalmente é no final da linha, pois desta forma a corrente de compensação necessária é mínima. Entretanto, em redes com diversos ramos, em cada ramo um APLC deve ser instalado.

A operação cooperativa distribuída permitiu que todos os APLCs influenciassem positivamente para a rede e não negativamente um no outro, permitindo que a compensação reduzisse nível de distorção harmônica, satisfazendo a norma IEEE-519. Em situações que os APLCs estão instalados em um único PAC, mesmo sem comunicação, o controle dividiu igualmente a potência de compensação entre as unidades. Além disso, o controle é robusto, pois quando considerou-se o sistema de distribuição com comportamento dinâmico de ele-



mentos, esse não apresentou instabilidades. Entretanto detectou-se que uma coordenação das unidades é necessária para que todos os PACs satisfaçam a norma de nível de distorção. Nesse sentido, o SG foi implementado, definindo novas referência de THD no tempo, assim os APLCs, operando com controle local, conseguiram minimizar os harmônicos de forma global. Como a coordenação tem transmissão de dados assíncrona, e na falta de novas referências os APLCs operam com a referência fixa de 5%, essa não apresenta instabilidades e problemas com falta ou erro de comunicação.

Pela análise dos resultados práticos, realizados na plataforma experimental desenvolvida, foi possível testar os pontos ótimos de localização dos filtros, assim como, a ação do controle e dimensionamento, frente a dinâmica dos elementos do SEP e da variação dos elementos instalados nesse.

## 6.1 Perspectivas de Trabalhos Futuros

1. modificar o algoritmo de otimização para alocação de DGs: a localização de compensadores apresentou resultados satisfatórios em relação a minimização de harmônicos no SEP, entretanto, sabe-se que, atualmente a instalação de geração distribuída tem ganhado destaque. De acordo com o estudo apresentado, é possível estudar a localização ótima desses geradores pela expansão da função objetivo;
2. modificar o algoritmo de otimização para estudo da influência de DGs já instalados no SEP: o algoritmo analisa a influência de um APLC, instalado em um PAC, em todos os PACs do SEP. Nesse sentido, o algoritmo pode ser utilizado para avaliar a influência da DG instalada por uma indústria ou casa em toda a rede de distribuição, em relação a redução de perdas, alteração do nível de tensão, e inclusive nível de THD, considerando que a DG é conectada por um conversor.
3. implementar uma rede real, de distribuição ou industrial: tanto o algoritmo como o controle foram implementados em um SEP de 18 barras, entretanto, a formulação pode ser estendida para SEP mais complexos, bem como, para redes reais;
4. utilizar a identificação do modelo dinâmico em tempo real;

5. analisar o controle frente a desequilíbrios e compensação reativa;
6. modificar a coordenação para incluir regulação do nível de tensão.

# Referências Bibliográficas

- ABOURIDA, S.; DUFOUR, C.; BELANGER, J.; YAMADA, T. e ARASAWA, T., Hardware-In-the-Loop Simulation of Finite-Element Based Motor Drives with RT-LAB and JMAG, In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, 2006., pp. 2462 –2466.
- ABU-MOUTI, F. e EL-HAWARY, M., Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 4, p. 2090–2101, 2011.
- AKAGI, H., Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 354 –363, 1997.
- ASTROM, K. J. e WITTENMARK, B., *Adaptive control systems*, Addison-Wesley, 1995.
- BERGEN, A. R., *Power System Analysis*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 1989.
- BRACALE, A.; CARAMIA, P.; CARPINELLI, G.; RUSSO, A. e VERDE, P., Site and System Indices for Power-Quality Characterization of Distribution Networks With Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1304–1316, 2011.
- CHANG, W. e GRADY, W., Minimizing harmonic voltage distortion with multiple current-constrained active power line conditioners, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 837 –843, 1997.
- CHANG, W.; GRADY, W. e SAMOTYJ, M., Meeting IEEE-519 harmonic voltage and voltage distortion constraints with an active power line conditioner, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 3, p. 1531 –1537, 1994.
- CHANG, W.; GRADY, W. e SAMOTYJ, M., Controlling harmonic voltage and voltage

- distortion in a power system with multiple active power line conditioners, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, p. 1670 –1676, 1995.
- CHENG, P.-T. e LEE, Z.-L., Distributed active filter systems (DAFS): a new approach to power system harmonics, In: *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 1, 2006., pp. 4 vol.(lvi+2822).
- DINAVAH, V.; REZA IRAVANI, M. e BONERT, R., Real-time digital simulation of power electronic apparatus interfaced with digital controllers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, p. 775 –781, 2001.
- DING, H.; LIU, W.; LI, Y.; DUAN, X.; WU, D.; LIN, Y.; CHEN, J.; ZHANG, R. e ZHANG, J., Development of an active power filter physical simulator connected with RTDS, In: *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2008., pp. 1206 –1211.
- DOYLE, J.; FRANCIS, B. e TANNENBAUM, A., 1990. *Feedback Control Theory*.
- EN-50160, *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*, 1999.
- FILHO, F.; CAO, Y. e TOLBERT, L., 11-Level cascaded H-bridge grid-tied inverter interface with solar panels, In: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010., pp. 968 –972.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Active Power Filter Localization on a Distributed Power System, In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America*, 2010a.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Cooperative filters: Localization and injected current control, In: *Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2010b., pp. 102 –107.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Cooperative control for active power compensators allocated in distributed networks, In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012a., pp. 2764 –2768.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Evaluating APLCs placement in a power system based on real-time simulation, In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012b., pp. 2011 –2016.
- GEHRKE, C. S.; SILVA, I. R. F. M. P.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Implementação em Sistema de Tempo Real em FPGA de uma Rede de Distribuição para Aplicação em

- Controle de APLC., In: *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2012c., pp. 4703–4710.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M.; OLIVEIRA, A. C. e SILVA, I. R. F. M. P., Power hardware-in-the-loop (PHIL) based on FPGA, In: *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 2013., p. 298.
- GEHRKE, C. S.; LIMA, A. M. e OLIVEIRA, A. C., Controlling harmonics in electrical power systems for satisfying total and individual harmonic distortion constraints, In: *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2014., p. 3342.
- GRADY, W., 2012. Understanding Power System Harmonics, cap. System Matrices and Simulation Procedures, University of Texas at Austin.
- GRADY, W.; SAMOTYJ, M. e NOYOLA, A., Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 6, n. 4, p. 1690 –1697, 1991.
- GRADY, W.; SAMOTYJ, M. e NOYOLA, A., The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1379 –1386, 1992.
- GRANDI, G. e LONCARSKI, J., Evaluation of current ripple amplitude in three-phase PWM voltage source inverters, In: *International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, 2013., pp. 156–161.
- GYUGYI, L. e STRYCUDA, E., Active AC Power Filters, In: *IEEE/IAS Annual Meeting*, 1976., pp. 529–535.
- IDRIS, R.; KHAIRUDDIN, A. e MUSTAFA, M., A multi-objective Bees Algorithm for optimum allocation of FACTS devices for restructured power system, In: *IEEE Region 10 Conference*, 2009., pp. 1–6.
- IEC61000-3-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current under 16 A per phase)*, 1995.
- IEC61000-3-4, *Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A*, 1998.
- IEEE-STD.519, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, 1993.

- JAVADI, A.; OLIVIER, G.; SIROIS, F. e YOUMSSI, A., Real-time laboratory implementation results of an active filter, In: *International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2010., pp. 329 –332.
- JINTAKOSONWIT, P.; AKAGI, H. e FUJITA, H., Performance of automatic gain adjustment in shunt active filters for harmonic damping throughout power distribution systems, v. 3, p. 1389 –1395 vol. 3, 2001.
- JINTAKOSONWIT, P.; AKAGI, H.; FUJITA, H. e OGASAWARA, S., Implementation and performance of automatic gain adjustment in a shunt-active filter for harmonic damping throughout a power distribution system, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 17, n. 3, p. 438 –447, 2002.
- JINTAKOSONWIT, P.; FUJITA, H.; AKAGI, H. e OGASAWARA, S., Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 39, n. 2, p. 556 – 564, 2003.
- KARABOGA, D., 2005. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Rel. Téc., Erciyes University.
- KEYPOUR, R.; SEIFI, H. e YAZDIAN-VARJANI, A., Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing, *Electric Power Systems Research*, v. 71, n. 1, p. 41–49, 2004.
- LEE, T.-L. e CHENG, P.-T., Design of a New Cooperative Harmonic Filtering Strategy for Distributed Generation Interface Converters in an Islanding Network, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 5, p. 1919 –1927, 2007.
- LEE, T.-L.; LI, J.-C. e CHENG, P.-T., Discrete Frequency Tuning Active Filter for Power System Harmonics, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1209 –1217, 2009.
- MARKIEWICZ, H. e KLAJN, A., 2004. Voltage Disturbances: Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Rel. Téc., Wroclaw University of Technology.
- MARTINEZ, J.; GUSTAVSEN, B. e DURBAK, D., Parameter determination for modeling system transients-Part I: overhead lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20,

- n. 3, p. 2038–2044, 2005.
- MAZIN, H.; XU, W. e HUANG, B., Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 1187–1195, 2011.
- NOCEDAL, J. e WRIGHT, S., *Numerical Optimization*, Springer-Verlag, New York, 1999.
- OTHMAN, N.; MUSIRIN, I.; RAHIM, M. e OTHMAN, Z., Bees algorithm technique for loss minimization in power transmission network using Static Var Compensator, In: *International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2010., pp. 164–169.
- PRODIST, *Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica, ANEEL, Rev.1, Res. Normativa no395/2009*, 2009.
- QIAN, L.; LIU, L. e CARTES, D., A Reconfigurable and Flexible Experimental Footprint for Control Validation in Power Electronics and Power Systems Research, In: *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, 2007., pp. 1995 –2000.
- RAMOS, D.; CORTES, J.; TORRES, H.; GALLEGO, L.; DELGADILLO, A. e BUITRAGO, L., Implementation of Genetic Algorithms in ATP for Optimal Allocation and Sizing of Active Power Line Conditioners, In: *IEEE/PES Transmission Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006., pp. 1 –5.
- SAINZ, L. e BALCELLS, J., Harmonic Interaction Influence Due to Current Source Shunt Filters in Networks Supplying Nonlinear Loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 3, p. 1385–1393, 2012.
- SAMPAIO, L.; DE BRITO, M.; ALVES, M.; E MELO, G. e CANESIN, C., Robust control applied to power flow control in single-phase inverter with LCL filter, using droop control and D-stability, In: *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2012., pp. 1–8.
- STEURER, M.; BOGDAN, F.; REN, W.; SLODERBECK, M. e WOODRUFF, S., Controller and Power Hardware-In-Loop Methods for Accelerating Renewable Energy Integration, In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007., pp. 1 –4.
- SURYANARAYANAN, S.; REN, W.; STEURER, M.; RIBEIRO, F. e HEYDT, G., A real-time controller concept demonstration for distributed generation interconnection, In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006., p. 3 pp.

- WOOD, A. J. e WOLLENBERG, B. F., *Power Generation Operation and Control*, John Wiley and Sons, New York, NY, 1996.
- XIAOLIN MAO, R. A. e KRISHNAMURTHY, H. K., Optimal Variable Switching Frequency Scheme for Reducing Switching Loss in Single-Phase Inverters Based on Time-Domain Ripple Analysis, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 4, p. 991–1001, 2009.
- XIAOPIN, Y.; XIAOMING, Z. e SHANGSHENG, L., Study on Hardware-in-the-Loop of Active Power Filter Based on RTDS, In: *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2010., pp. 4295 –4298.
- ZIARI, I. e JALILIAN, A., A New Approach for Allocation and Sizing of Multiple Active Power-Line Conditioners, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 2, p. 1026 –1035, 2010.



# A

## Tabelas dos elementos do SEP

Tabela A.1: Dados dos segmentos de linha do SEP estudado.

PAC		Comprimento [milhas]	$R$ [%]	$x_L$ [%]	$Q_c$ [%]	Base [ $\Omega$ ]
De	Para					
1	2	0.318	0.431	1.204	0.0035	15.625
2	3	0.443	0.601	1.677	0.0049	15.625
3	4	0.233	0.316	0.882	0.0026	15.625
4	5	0.661	0.896	2.502	0.0073	15.625
5	6	0.218	0.295	0.824	0.0024	15.625
6	7	0.455	1.720	2.120	0.0046	15.625
7	8	0.568	4.070	3.053	0.0051	15.625
2	9	0.451	1.706	2.209	0.0043	15.625
1	10	0.769	2.910	3.768	0.0074	15.625
10	11	0.587	2.222	2.877	0.0056	15.625
11	12	1.269	4.803	6.218	0.0122	15.625
11	13	1.053	3.985	5.160	0.0101	15.625
13	14	0.769	2.910	3.768	0.0074	15.625
13	15	0.985	3.727	4.593	0.0100	15.625
15	16	0.583	2.208	2.720	0.0059	15.625

Tabela A.2: Dados da carga e banco de capacitores do SEP estudado.

PAC	$P$ [%]	$Q$ [%]	$Q_b$ [%]
1	0.0	0.0	0.0
2	2.0	1.2	-10.5
3	4.0	2.5	-6.0
4	15.0	9.3	-6.0
5	30.0	22.6	-18.0
6	8.0	5.0	0.0
7	2.0	1.2	-6.0
8	10.0	6.2	0.0
9	5.0	3.1	0.0
10	10.0	6.2	-6.0
11	3.0	1.9	-12.0
12	2.0	1.2	0.0
13	8.0	5.0	0.0
14	5.0	3.1	-15.0
15	10.0	6.2	9.0
16	2.0	1.2	-12.0

# B

## Controle de decaimento de geradores

Para identificar a variação de carga, o controlador mede a frequência, logo o impacto da mudança de potência da carga na frequência é modelada por:

$$D = \frac{\Delta P_L}{\Delta \omega}, \quad (\text{B.1})$$

em que  $D$  é expresso pela porcentagem da mudança de  $\Delta P_L$  em  $\Delta \omega$ , por exemplo, se a carga varia 1.5% e a frequência varia 1%,  $D=1.5$ .

Segundo as simplificações utilizadas em (WOOD e WOLLENBERG, 1996), o modelo do gerador pode ser representado pelo momento angular, assim a função transferência é dada por:

$$G_G(s) = \frac{\Delta P_L - \Delta P}{\Delta \omega} = \frac{1}{Ms}. \quad (\text{B.2})$$

Nota-se que tanto a variação da carga como a função transferência do gerador dependem de  $\Delta \omega$  e  $\Delta P_L$ , dessa forma é possível representar ambas as plantas por:

$$G_{GS}(s) = \frac{1}{Ms + D}. \quad (\text{B.3})$$

A planta da turbina foi modelada pela constante de tempo:

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_{valve}}{\Delta P} = \frac{1}{sT_T + 1}, \quad (\text{B.4})$$

e por fim, o controlador de válvula foi representando por:

$$G_V(s) = \frac{\Delta P^* + \frac{\Delta \omega}{R}}{\Delta P_{valve}} = \frac{1}{sT_V + 1}. \quad (\text{B.5})$$

A partir das equações acima foi determinada o diagrama de blocos de controle para um gerador no SEP, Figura B.1.

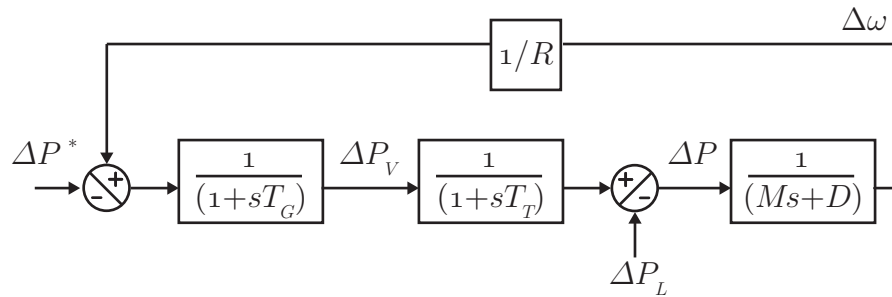


Figura B.1: Controle de um gerador no SEP.

Quando dois geradores com controle de decaimento são conectados ao SEP, esses devem operar com frequência única e dividir a potência da carga. A operação para ajuste da potência de cada gerador é ilustrada na Figura B.2. Quando há um aumento de carga, isso resulta na redução de velocidade do gerador. O controle aumenta a saída até encontrar uma frequência única de operação. A variação de carga na saída de cada unidade é proporcional a inclinação da característica de decaimento. A unidade 1 aumenta a saída de  $P_1$  para  $P'_1$ , a unidade 2 aumenta a saída de  $P_2$  para  $P'_2$ , assim cada gerador aumenta,  $P'_1 - P_1 + P'_2 - P_2$ , que é uma variação igual a  $\Delta P_L$ .

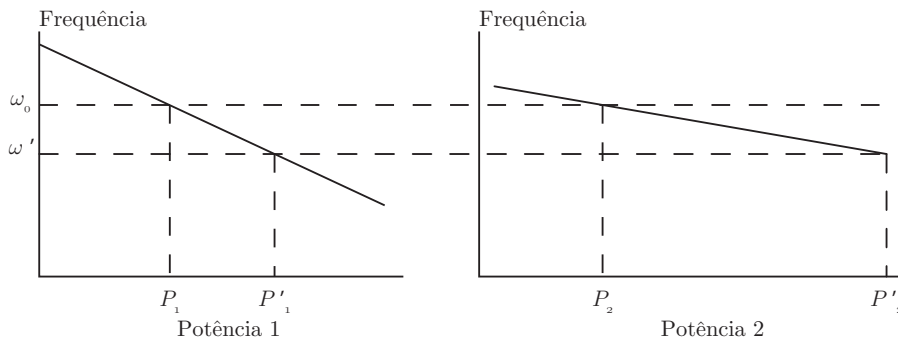


Figura B.2: Gráfico da variação da potência de saída dos geradores com uma variação de carga.

O gráfico da Figura B.2 pode ser expresso pelas equações a seguir:

$$\omega' = \omega_0 + (R_1)(P_1 - P'_1), \tag{B.6}$$

$$\omega' = \omega_0 + (R_2)(P_2 - P'_2). \tag{B.7}$$

Quando um carga aumenta, cada gerador operaria em uma frequência intrínseca a máquina, o que levaria à instabilidade ao sistema, por isso foi adicionada, entre a entrada de

frequência e o gerador, um ganho  $1/R$ , conforme apresentado na Figura B.1. Esse ganho permite que a referência de frequência varie dentro de limites máximos e mínimos, adicionando ao controlador uma característica de decaimento (*droop*). O valor de  $R$  pode ser definido pela reta de decaimento, que relaciona valores mínimos e máximos de variação de frequência e capacidade de potência do gerador. O valor usualmente utilizado é  $R = 0,05$ , sendo que se todos os geradores, em um mesmo SEP, apresentam o mesmo valor de  $R$ , os geradores operam em cooperação com divisão de potência das cargas. Isso pode ser comprovado analisando a equação de malha fechada do controle, Equação (B.8), em regime permanente, Equação (B.9).

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_L(s) \left[ \frac{\frac{-1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{R} \left( \frac{1}{1+sT_G} \right) \left( \frac{1}{1+sT_T} \right) (Ms+D)} \right] \quad (B.8)$$

$$\begin{aligned} \Delta\omega \text{ em regime permanente} &= \lim_{s \rightarrow 0} [s\Delta\omega] \\ &= \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D} \end{aligned} \quad (B.9)$$

$$\text{para vários geradores :} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N} + D}$$

Observa-se ainda na Figura B.1 que há uma referência de potência,  $\Delta P^*$ . Essa referência altera a constante da reta de decaimento, Figura B.3, portanto, a referência de potência na frequência nominal pode ser alterada, e assim, mudar a porcentagem de potência que o gerador impõem ao SEP.

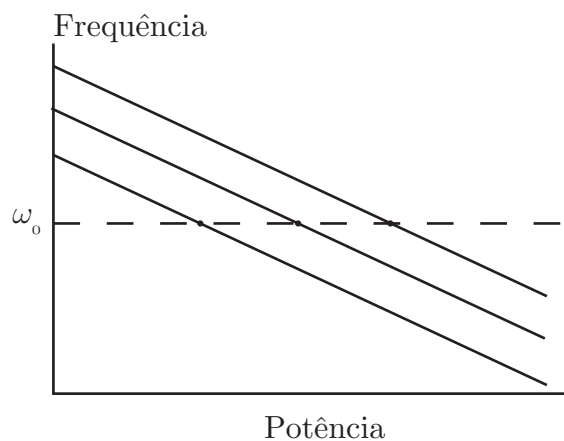


Figura B.3: Mudança das características de frequência em relação a potência para um gerador.

A entrada,  $\Delta P^*$ , é controlada pelo controle suplementar de geradores, como é ilustrado na Figura B.4. Esse controle é utilizado para compensar pequenos erros entre os geradores,

pois quando dois geradores são considerados, aparece um acoplamento entre eles representado por  $T/s$ . Assim, como a realimentação com o ganho da inclinação  $1/R$  que garante que os geradores dividam a variação da potência da carga, o  $B$  define a inclinação da frequência no controle suplementar, sendo calculado por  $B = (1/R + D)$ . Assim, o erro entre as áreas é nulo. Considera-se que cada gerador opera sobre uma área, assim, gerador 1 controla a Área 1 e o gerador 2 controla a Área 2, conforme Figura B.4.

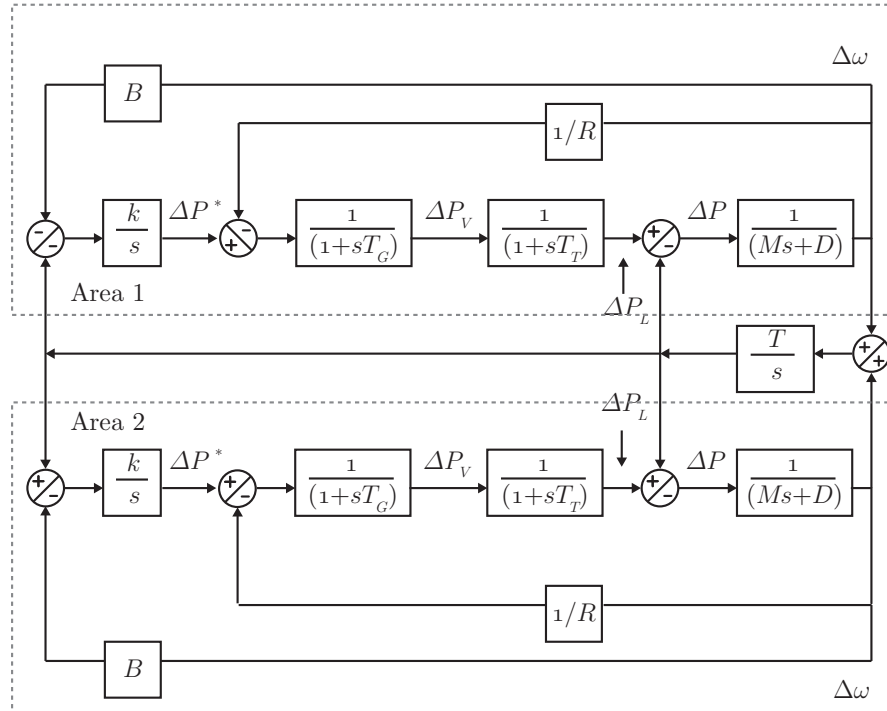


Figura B.4: Controle de geradores no SEP.

A análise do controle de geradores no SEP constitui uma ferramenta de estudo de estabilidade, pois viabiliza a aplicação dos métodos de sistemas lineares. Essa análise disponibiliza importantes informações sobre a dinâmica do sistema frente a variações de carga, as quais são fundamentais para o projeto de controladores de APLCs em redes de distribuição. O controle de fluxo de potência ativa é predominantemente vinculado ao controle da frequência em SEP. O controle suplementar e ação integral para a restauração da frequência nominal do subsistema permite a distribuição local do fluxo de potência ativa de forma satisfatória. Para sistemas interligados em grande porte, cuja rede apresenta áreas distintas, o controle de referência do fluxo de potência ativa entre as áreas,  $\Delta P^*$ , exige o estabelecimento de uma comunicação entre os subsistemas que controlam as respectivas áreas.