METRÔ - DF	ENGEVIX	CODIFICAÇÃO ENGEVIX P00160/01-5X-RL-0022-0B

SETOR	
ENDEREÇO	
PROPRIETÁRIO	METRÔ - DF
AUTOR DO PROJETO	IDYLIO THOMAZINNI FILHO / FLAVIO RESENDE GARCIA
RESPONSÁVEL TÉCNICO	

METRÔ - DF

IDYLIO THOMAZINNI FILHO CREA N° 5060007017

METRÔ - DF

SISTEMA: ENERGIA			
SUBSISTEMA: FILTRO DE HARMÔNICAS			
VISTO: ELJ/RJF	DATA: 29/08/14	LOCAL: GERAL	
APROVADO: RMP	DATA: 05/12/14	COMPONENTES /TIPO DE DOCUMENTO: ESTUDO DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS E FILTRO DE HARMÔNICAS	AREA DE CONST.: -
ESCALA: **S/ESC.**	ETAPA DO PROJ.: Básico		
N MICROFILME:	FOLHA: 1/114	CODIFICAÇÃO: **RT.4/EX.99/00.022**	REVISÃO: **1**

1	**APROVADO CONFORME O PARECER 0530/14-TEN**	**05/12/14**	**FRG/PRA**	**MS**	**ITF**	**ELJ/RJF**	**RMP**
0B	ATENDENDO PARECER 0514/14-TEN	07/10/14	FRG/PRA	MS	ITF	ELJ/RJF	RMP
0A	ATENDENDO PARECER 0495/14-TEN	07/10/14	FRG/PRA	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
0	EMISSÃO INICIAL	29/08/14	FRG/PRA	ECoA	ITF	ELJ/RJF	RMP
N°	MODIFICAÇÃO	DATA	FEITO	VISTO	APROVO	VERIF.	APROV
		CONTRATADA				**METRÔ - DF**	
R E V I S Õ E S							

METRÔ-DF
RT.4/EX.99/00.022

ESTUDO DE FILTRO DE HARMÔNICAS
RELATÓRIO TÉCNICO

SISTEMA DE ENERGIA
PROJETO BÁSICO

LISTA DE ABREVIAÇÕES

CEB – Companhia Energética de Brasília;

CN – Ceilândia Norte;

DHTi – Distorção Harmônica Total de Corrente;

DHTv – Distorção Harmônica Total de Tensão;

EN – Estádio Nacional;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;

kV – Quilo Volts;

kVA – Quilo Volt Ampère;

kVAr – Quilo Volt Ampère Reativo;

MVA – Mega Volt Ampère;

PAC – Ponto de Acoplamento Comum;

PQF – Power Quality Filter;

RCT – Reator Controlado a Tiristor;

RNS – Reator a Núcleo Saturado;

SE – Subestação de Energia;

SO – Samambaia Oeste;

SR – Subestação Retificadora;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 13

1.1 FATOR DE POTÊNCIA 13

1.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA 13

2 INFORMAÇÕES TÉCNICAS UTILIZADAS NA ELABORAÇÃO DOS ESTUDOS 14

2.1 PREMISSAS DO TRABALHO: 14

2.2 POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO NO PAC 15

2.3 DADOS DOS TRANSFORMADORES 15

2.4 DADOS DOS CABOS 16

2.5 DADOS DAS CARGAS 18

2.6 POTÊNCIA DISPONÍVEL NAS SES 19

2.7 DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO 19

2.7.1 ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS OPERAÇÃO NORMAL 20

2.7.2 ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS OPERAÇÃO EM CONTINGÊNCIA 20

2.7.3 ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA OPERAÇÃO NORMAL 21

2.7.4 ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA OPERAÇÃO EM CONTINGÊNCIA 21

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO 22

3.1 TEORIA DE CÁLCULO DE FILTROS DE HARMÔNICOS PASSIVOS E COMPENSAÇÃO REATIVO 22

3.2 METODOLOGIA DO PQF 22

3.3 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA PQF 24

3.4 PROCESSO MATEMÁTICO: 25

3.4.1 ELIMINAÇÃO DE GAUSS: 27

4 RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA – COMPATIBILIDADE 29

5 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASOS 29

5.1 ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS 30

5.1.1 1º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS: SITUAÇÃO ATUAL SEM FILTROS 30

5.1.2 2º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS: SITUAÇÃO ATUAL COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 35

5.1.3 3º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS: SITUAÇÃO FUTURA COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 40

5.1.4 4º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO ATUAL SEM FILTROS 45
5.1.5 5º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO ATUAL COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 50
5.1.6 6º CASO – ANEL CEILÂNDIA SUL/ÁGUAS CLARAS CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO FUTURA COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 55
5.2 ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA 60
5.2.1 1º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA: SITUAÇÃO ATUAL SEM FILTROS 60
5.2.2 2º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA: SITUAÇÃO ATUAL COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 65
5.2.3 3º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA: SITUAÇÃO FUTURA COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 70
5.2.4 4º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO ATUAL SEM FILTROS 75
5.2.5 5º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO ATUAL COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 80
5.2.6 6º CASO – ANEL BRASÍLIA CENTRO/HÍPICA CONTINGÊNCIA: SITUAÇÃO FUTURA COM FILTROS DE 5ª, 7ª E 11ª ORDEM 85
6 ESPECIFICAÇÃO DOS FILTROS 90
6.1 PEE/HIP 91
6.2 SE CEILÂNDIA SUL 91
6.3 SE ÁGUAS CLARAS 91
6.4 SE BRASÍLIA CENTRO 92
7 CONCLUSÕES 93
ANEXO I - TEORIA DE CÁLCULO DE FILTROS DE HARMÔNICOS PASSIVOS 98
1 INTRODUÇÃO 99
2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS 99
2.1 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS 100
2.1.1 COMPORTAMENTO DA ENERGIA 103
2.1.2 FATOR DE QUALIDADE 104
2.1.3 DESSINTONIA 105
2.2 FILTROS PASSIVOS AMORTECIDOS 105
2.2.1 FILTRO AMORTECIDO DE 2ª ORDEM 106
2.2.2 FILTRO AMORTECIDO DE 3ª ORDEM 109

2.2.3 FILTRO AMORTECIDO TIPO "C".....111
3 PROCEDIMENTO BÁSICO DE CÁLCULO DE FILTROS HARMÔNICOS.....112
ANEXO II - POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO.....113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....14

Tabela 2 – Limites de distorção harmônica tensão.....14

Tabela 3 – Nível de curto-circuito. 15

Tabela 4 – Tensão de operação das SEs/PEEs. 15

Tabela 5 – Impedância dos cabos do Anel Brasília Centro/ PEE Hípica. 16

Tabela 6 – Impedância dos cabos do Anel Águas Claras/ PEE Hípica. 16

Tabela 7 – Impedância dos cabos do Anel Ceilândia Sul/Águas Claras.....17

Tabela 8 – Potência das cargas das SRs. 18

Tabela 9 – Potência Reativa disponível nas SEs para o projeto dos filtros 19

Tabela 10 – Potência reativa total necessária nas SEs para o projeto dos filtros.....19

Tabela 11 – Fluxo de Carga nas SEs/PEE do sistema existente do Metrô-DF 29

Tabela 12 – Casos de Estudo de Harmônicos.....29

Tabela 13 – Resumo da DHTv e DHTi e FP do Anel Ceilândia Sul/Águas Claras. 93

Tabela 14 – Resumo da DHTv e DHTi e FP do Anel Brasília Centro/Hípica 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Ceilândia Sul/Águas Claras para operação normal. 20

Figura 2 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Ceilândia Sul/Águas Claras para operação em contingência. 20

Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Brasília Centro/Hípica para operação normal. 21

Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Brasília Centro/Hípica para operação em contingência. 21

Figura 5 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas, sem filtro. 30

Figura 6 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 30

Figura 7 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 31

Figura 8 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 32

Figura 9 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 33

Figura 10 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 34

Figura 11 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros. 35

Figura 12 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 35

Figura 13 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 36

Figura 14 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 37

Figura 15 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 38

Figura 16 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 39

Figura 17 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros. 40

Figura 18 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 40

Figura 19 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 41

Figura 20 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 42

Figura 21 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 43

Figura 22 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 44

Figura 23 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas, sem filtro. 45

Figura 24 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 45
Figura 25 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 46
Figura 26 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 47
Figura 27 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 48
Figura 28 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 49
Figura 29 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros. 50
Figura 30 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 50
Figura 31 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 51
Figura 32 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 52
Figura 33 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 53
Figura 34 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 54
Figura 35 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros. 55
Figura 36 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 55
Figura 37 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 56
Figura 38 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 57
Figura 39 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 58
Figura 40 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 59
Figura 41 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 60
Figura 42 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 60
Figura 43 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 61
Figura 44 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 62
Figura 45 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 63
Figura 46 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 64
Figura 47 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 65
Figura 48 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 65
Figura 49 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 66

Figura 50 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 67
Figura 51 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 68
Figura 52 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 69
Figura 53 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 70
Figura 54 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 70
Figura 55 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 71
Figura 56 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 72
Figura 57 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 73
Figura 58 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 74
Figura 59 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 75
Figura 60 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 75
Figura 61 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 76
Figura 62 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 77
Figura 63 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 78
Figura 64 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 79
Figura 65 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 80
Figura 66 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 80
Figura 67 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 81
Figura 68 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 82
Figura 69 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 83
Figura 70 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 84
Figura 71 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros. 85
Figura 72 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras. 85
Figura 73 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 86
Figura 74 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 87
Figura 75 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente. 88

Figura 76 – Valores de Tensão, Corrente e Potência. 89

1 INTRODUÇÃO GERAL

O presente relatório tem como objetivo apresentar o impacto harmônico nas SEs que alimentam o sistema Metrô-DF. Em virtude das características elétricas da alimentação do sistema, retificador a 12 pulsos, há harmônicos de 11ª e 13ª ordem. Contudo, através das medições realizadas anteriormente no sistema CEB, além das harmônicas características supracitadas, constatou-se a presença de 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica, oriundas de cargas não lineares residenciais/comerciais que possuem a mesma alimentação que o Metrô-DF.

Atualmente, a maior parte das cargas de uma residência/comércio são não lineares (televisores, fontes chaveadas, motores, lâmpadas fluorescente, condicionadores de ar, etc). A soma dos harmônicos produzidos por estas cargas, de várias residências, aumentam as distorções harmônicas no ponto de alimentação e, portanto, devem ser consideradas nas simulações.

A empresa que será responsável pelo fornecimento dos filtros de harmônicos deverá realizar medições de harmônicas nas barras de conexão entre o Metrô-DF e a CEB, visando confirmar os valores de injeção harmônica pré-existentes nestes pontos da rede elétrica.

1.1 Fator de Potência

O Fator de potencia e definido como a relação entre a potência ativa e a potencia aparente numa instalação, num dado intervalo de tempo. Este índice reflete a eficiência do uso da energia que esta sendo utilizada, ou seja, a relação entre a potência ativa (realmente útil) e a potencia aparente (energia total) de uma instalação.

A ANEEL, através da Resolução Normativa nº469/2011 aprova a revisão do PRODIST que regulamenta o valor de fator de potência no ponto de medição conforme texto abaixo.

“3.2.1 - Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 (um) indutivo ou 1,00 (um) e 0,92 (noventa e dois centésimos) capacitivo, de acordo com regulamentação vigente.”

A Resolução Normativa nº 479/2012 regulamente o valor do fator de potência indicando os períodos a serem respeitados conforme texto abaixo.

“§ 1º Para a apuração do ERE e DRE(p), deve-se considerar:

I - o período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h 30min e 6h 30min, apenas os fatores de potência “fT” inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”;

II - o período diário complementar ao definido no inciso I, apenas os fatores de potência “fT” inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”.”

1.2 Distorção Harmônica

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

A ANEEL, através da Resolução Normativa nº469/2011 aprova a revisão do PRODIST que regulamenta os níveis de distorção harmônica de tensão conforme texto e tabelas abaixo.

"4.6.1 - Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão indicados na Tabela 1 a seguir. Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados."

Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

(em porcentagem da tensão fundamental)

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

A IEEE 519/2014 também apresenta recomendações quanto aos níveis de distorção harmônica de tensão conforme a tabela abaixo.

Tabela 2 – Limites de distorção harmônica tensão

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT) [%]
$V_N \leq 1kV$	8
$1kV < V_N \leq 69kV$	5
$69kV < V_N \leq 161kV$	2,5
$161kV < V_N$	1,5

2 INFORMAÇÕES TÉCNICAS UTILIZADAS NA ELABORAÇÃO DOS ESTUDOS

2.1 Premissas do Trabalho:

a) Referências Normativas:

- ✓ IEEE 519/2014;
- ✓ PRODIST: MÓDULO 8 – Qualidade de Energia Elétrica;
- ✓ Obs.: As soluções propostas neste relatório buscaram atender a Norma IEEE 519/2014.

a) Estudos baseados nos resultados das medições realizadas pelo Metrô-DF nas SEs Brasília Centro, Águas Claras e Ceilândia Sul, bem como nas SRs 02 e 07. As injeções harmônicas adicionais incrementadas nas barras das SEs contemplam às injeções provenientes das cargas residenciais, comerciais e/ou industriais presentes no sistema CEB, tendo em vista que os transformadores de 20 MVA atendem ao Metrô-DF e as demais cargas.

b) Os dados utilizados neste estudo de fluxo de harmônicos se baseou nos mesmos utilizados pelos estudos de fluxo de carga, bem como em seus resultados de tensão e potências.

c) Tendo em vista a operação futura dos filtros a serem instalados pelo Metrô–DF, deverão contemplar as harmônicas adicionais geradas pelo crescimento natural das cargas residenciais, comerciais e/ou industriais foi previsto um fator de crescimento médio de 3,5% ao ano, por um período de 20 anos (tempo de vida útil previsto para os filtros).

2.2 Potência de curto-circuito no PAC

As potências de curto-circuito nos Pontos de Acoplamento Comum (PAC) utilizadas nas simulações, conforme informado pela CEB (Anexo II), são:

Tabela 3 – Nível de curto-circuito.

Subestação			Potência de curto-circuito Trifásico		Potência de curto-circuito Monofásico	
Nº da Barra	Descrição	Tensão (kV)	Módulo (MVA)	Ângulo (°)	Módulo (MVA)	Ângulo (°)
17112	SE-AC	13,800	421,34	-88,12	450,80	-88,66
17122	SE-BC	13,800	473,11	-89,34	486,52	-89,55
17162	SE-CS	13,800	365,80	-89,39	374,65	-89,58
17372	SE-HP	13,800	253,12	-89,36	258,59	-89,56

As tensões utilizadas nas simulações estão de acordo com o relatório de fluxo de carga RT.4/EX.99/00.014, conforme tabela abaixo.

Tabela 4 – Tensão de operação das SEs/PEEs.

Subestação	Tensão (kV)
SE-AC	13,9
SE-CS	13,9
SE-BC	13,4
PEE/HIP	13,4

2.3 Dados dos Transformadores

Não houve a necessidade, neste momento, de modelar os transformadores das SEs (138/13,8 kV), uma vez que a simulações tem como referência os secundários

dos mesmos, em 13,9 kV para o anel Ceilândia Sul/Águas Claras, e 13,4kV para o anel Brasília Centro/Hípica, conforme relatório de fluxo de carga RT.4/EX.99/00.014. As potências de curto-circuito informadas já contemplam as impedâncias dos transformadores.

2.4 Dados dos Cabos

As Tabelas abaixo apresentam as impedâncias dos cabos que alimentam as SRs conforme os valores informados no relatório de fluxo de carga RT.4/EX.99/00.014.

Tabela 5 – Impedância dos cabos do Anel Brasília Centro/ PEE Hípica.

De	Para	Bitola (mm²)	Impedâncias (Ω)
PEE/HIP	SR03	120	1,133788 + 1,02114j
PEE/HIP	SR04	120	0,64814 + 0,5167j
SR03	SR01	120	0,64741 + 0,65382j
SR04	SR02	120	0,9494 + 0,9588j
SE BC	SR02	240	0,55946 + 1,25853j
SE BC	SR01	240	0,5217 + 1,2126j
SR01	E1	25	0,696 + 0,1275j
SR01	E2	25	0,0928 + 0,017j
SR02	E3	25	0,12064 + 0,0221j
SR02	E4	25	0,8352 + 0,153j
SR03	E5	25	0,696 + 0,1275j
SR03	E6	25	0,0928 + 0,017j
SR03	E7	25	0,696 + 0,1275j
SR04	E8	25	0,696 + 0,1275
SR04	E9	25	0,0928 + 0,017j

Tabela 6 – Impedância dos cabos do Anel Águas Claras/ PEE Hípica.

De	Para	Bitola (mm²)	Impedâncias (Ω)
SE AC	SR8	240	0,429532 + 0,549936j
SE AC	SR7	240	0,672532 + 0,841536j
PEE/HIP	SR5	120	0,01055 + 0,0143j
PEE/HIP	SR6	120	0,50456 + 0,34863j
SR6	SR8	120	1,141448 + 0,8554j
SR5	SR7	120	1,137856 + 0,85916j

Tabela 7 – Impedância dos cabos do Anel Ceilândia Sul/Águas Claras.

De	Para	Bitola (mm²)	Impedâncias (Ω)
SE CS	SR12	300	0,1011 + 0,16416j
SE CS	SR13	240	0,39496 + 0,88878j
SR12	SR14	150	0,75123 + 1,12205j
SR13	SR11	120	1,17112 + 1,52248j
SR14	SR10	95	2,75285 + 2,66744j
SR11	SR62	4/0	1,57931 + 2,25636j
SR10	SR61	120	0,784448 + 0,53708j
SR62	SR09	120	1,228336 + 0,84368j
SE AC	SR09	240	0,12198 + 0,16884j
SE AC	SR61	240	0,07248 + 0,10944j
SE AC	SM	50	0,2988 + 0,1344j
SR09	E17	25	0,28304 + 0,05185j
SR09	SM	50	0,74445 + 0,27735j
SR10	E18	25	0,928 + 0,17j
SR10	E19	25	0,12064 + 0,0221j
SR10	E20	25	1,27136 + 0,2329j
SR61	E30	25	0,12064 + 0,0221j
SR62	E31	25	1,32704 + 0,2431j
SR62	E32	25	0,12528 + 0,02295j
SR62	E33	25	1,68896 + 0,3094j
SR11	E21	25	0,02784 + 0,0051j
SR12	E22	25	0,5568 + 0,102j
SR12	E23	25	0,464 + 0,085j
SR13	E24	25	0,928 + 0,17j
SR13	E25	25	0,1856 +0,034j
SR14	E26	25	0,0928 + 0,017j
SR14	E27	25	0,95584 + 0,1751j

2.5 Dados das Cargas

A Tabela abaixo apresenta os valores das potências das cargas das SRs conforme o relatório de fluxo de carga RT.4/EX.99/00.014.

Tabela 8 – Potência das cargas das SRs.

Subestação	SRs	Potência (kVA)	FP
SEs Existentes	SR14	2637,79	0,95
	SR13	3140,09	0,95
	SR12	3195,71	0,95
	SR11	3353,47	0,95
	SR10	4341,38	0,93
	SR09	3656,95	0,95
	SR62	4019,81	0,95
	SR61	3347,53	0,95
	SR8	2238,24	0,95
	SR7	2805,85	0,95
	SR6	2488,16	0,94
	SR5	2975,96	0,95
	SR4	3809,88	0,93
	SR3	4331,18	0,93
	SR2	2879,29	0,94
	SR1	2553,19	0,93

Observação: As potências das SRs apresentada na tabela acima contemplam as cargas de tração e auxiliares.

Para as cargas residenciais não lineares alimentadas pelas SEs Ceilândia Sul, Águas Claras e Brasília Centro, a modelagem contempla injeções de correntes de 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica de forma que a distorção total de tensão nos PEEs representem os valores apresentados nas medições enviadas pelo Metrô-DF.

Para a subestação Hípica, em virtude da falta de informação sobre a distorção total de tensão, considera-se uma injeção de correntes harmônicas de aproximadamente igual a 20% do valor das correntes harmônicas da SE Brasília Centro.

2.6 Potência disponível nas SEs

A Tabela 9 apresenta os valores de potência reativa para o cálculo dos filtros, conforme relatório de fluxo de carga do trecho existente RT.4/EX.99/00.014.

Tabela 9 – Potência Reativa disponível nas SEs para o projeto dos filtros

Subestação	Potência reativa (kVAr)
Ceilândia Sul	4200,00
Águas Claras	6500,00
Brasília Centro	2800,00
Hípica	4200,00

Tabela 10 – Potência reativa total necessária nas SEs para o projeto dos filtros

Subestação	Potência reativa do filtro (kVAr)
Ceilândia Sul	2700
Águas Claras	2700
Brasília Centro	2700
Hípica	2700

Observação: O dimensionamento dos filtros de harmônicos, cujo montante atinge 2700 kVAr em cada SE/PEE, teve como base a necessidade de reativos prevista no fluxo de carga, a padronização dos equipamentos, bem como a suportabilidade mínima necessária às correntes harmônicas que serão drenadas pelos filtros. Esta quantidade de reativos é suficiente para a correção do FP e para diminuir as distorções harmônicas de tensão nos PEEs, conforme recomenda a IEEE 519/2014.

As potências serão distribuídas nos filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordens a serem instalados em cada uma das SEs visando à correção do fator de potência e a filtragem das harmônicas de forma adequada.

2.7 Diagrama Unifilar Simplificado

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam, respectivamente, os diagramas unifilares da Rede de Alimentação no trecho existente, Anel Ceilândia Sul/Águas Claras e Anel Brasília Centro/Hípica respectivamente.

Observação: As configurações supracitadas serão simuladas de forma independente conforme relatório de fluxo de carga e assim como a operação em contingência.

2.7.1 Anel Ceilândia Sul/Águas Claras Operação Normal

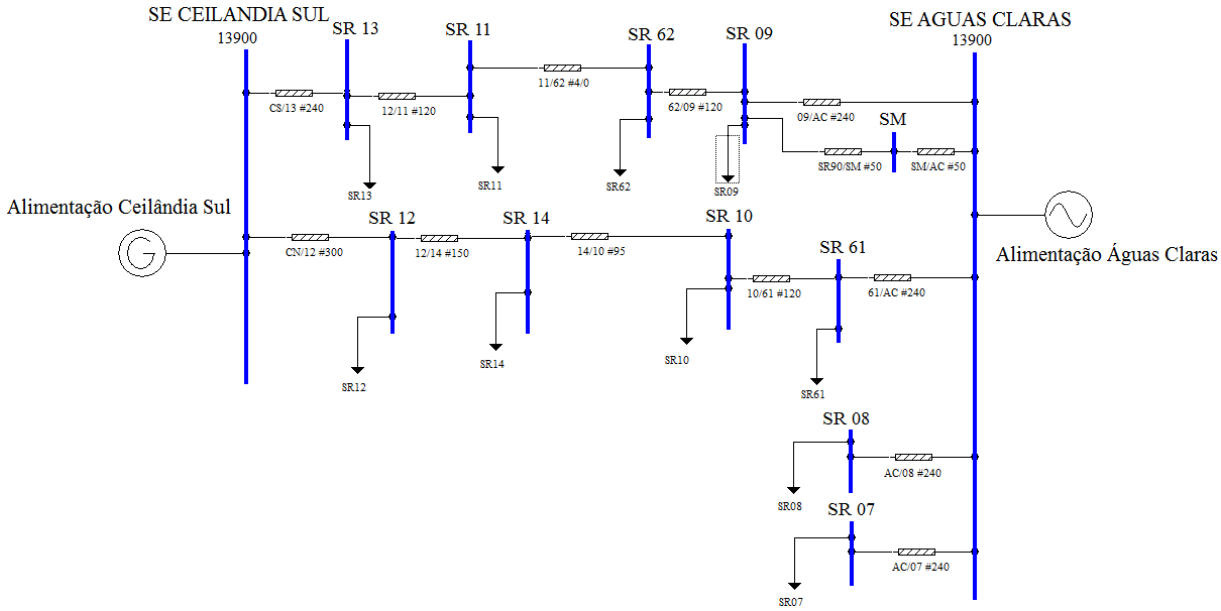


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Ceilândia Sul/Águas Claras para operação normal.

Obs.: Tensão de referência utilizada na simulação é de 13,9kV, conforme Tabela 4.

2.7.2 Anel Ceilândia Sul/Águas Claras Operação em Contingência

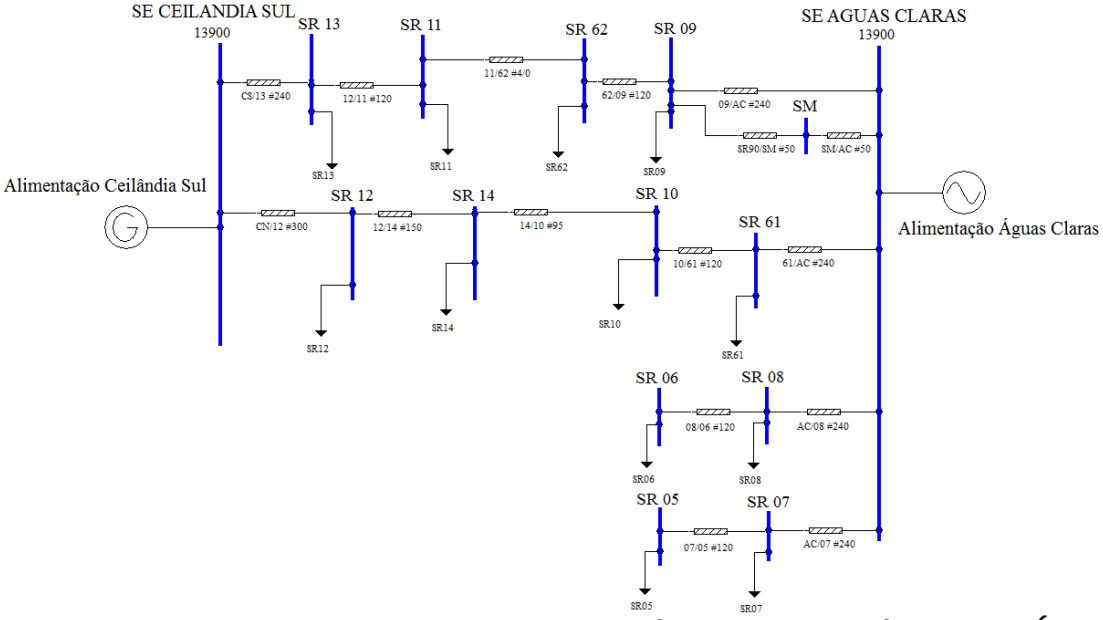


Figura 2 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Ceilândia Sul/Águas Claras para operação em contingência.

Obs.: Tensão de referência utilizada na simulação é de 13,9kV, conforme Tabela 4.

2.7.3 Anel Brasília Centro/Hípica Operação Normal

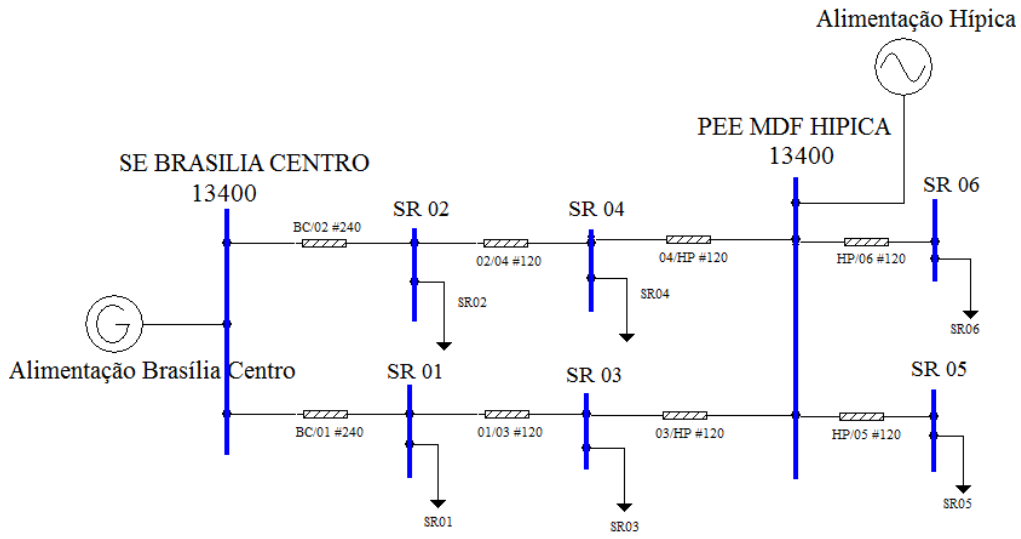


Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Brasília Centro/Hípica para operação normal.

Obs.: Tensão de referência utilizada na simulação é de 13,4kV, conforme Tabela 4.

2.7.4 Anel Brasília Centro/Hípica Operação em Contingência

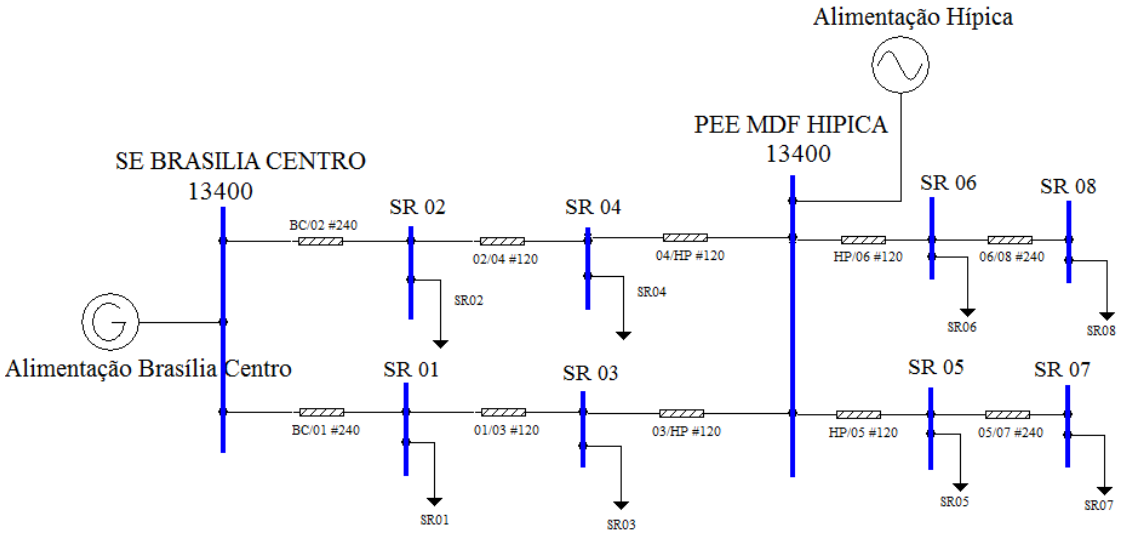


Figura 4 – Diagrama unifilar do sistema Metrô-DF, Anel Brasília Centro/Hípica para operação em contingência.

Obs.: Tensão de referência utilizada na simulação é de 13,4kV, conforme Tabela 4.

3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para estudar o fluxo harmônico na Rede de Alimentação para os trechos em expansão foi elaborado um estudo com base na teoria para cálculo de distorções harmônicas e compensação reativa e como ferramenta de cálculo utiliza-se o programa computacional PQF (Power Quality Filter).

3.1 Teoria de Cálculo de Filtros de Harmônicos Passivos e Compensação Reativo

A teoria aplicada neste estudo está apresentada no anexo I deste relatório sendo estruturada da seguinte forma:

a) Introdução geral do estudo
b) Definição e Classificação dos Filtros de Harmônicos
c) Filtros Passivos Sintonizados
   - ✓ Comportamento da Energia
   - ✓ Fator de Qualidade
   - ✓ Dessintonia
d) Filtros Passivos Amortecidos
   - ✓ Filtro Amortecido de 2ª Ordem
   - ✓ Filtro Amortecido de 3ª Ordem
   - ✓ Filtro Amortecido Tipo "C".
e) Procedimento Básico de Cálculo de Filtros Harmônicos

Os cálculos específicos são efetuados pelo programa computacional PQF (Power Quality Filter) com a metodologia exposta a seguir.

3.2 Metodologia do PQF

Os programas computacionais para estudos de fluxo harmônico utilizam, em geral, métodos de solução que se assemelham, em alguns casos, àqueles aplicados aos estudos de fluxo de carga tradicionais.

A estrutura geral seguida para a solução de tais estudos determina a necessidade da existência dos seguintes aspectos:

- ✓ Determinação das gerações de harmônicas de tensão e corrente do sistema; Neste caso utilizaram-se as medições realizadas em 2001 e 2014 nas SRs, que praticamente não se alteraram visto que não houve ampliação da carga.

- ✓ Representação apropriada dos componentes passivos do sistema para cada frequência harmônica considerada;

- ✓ Obtenção da matriz admitância para cada frequência harmônica;

- ✓ Utilização de um processo de solução para a equação matricial:

$$[V]_h \, x [Y]_h = [I]_h$$

Onde:

[V]h = Vetor solução da equação;

[I]h = Vetor independente da equação;

[Y]h = Matriz dos coeficientes da equação;

h = Ordem harmônica em estudo.

Apresentação dos resultados de tensões harmônicas nas barras e correntes harmônicas nas linhas da rede elétrica em estudo.

Tais programas têm como principais objetivos:

a) O cálculo das impedâncias harmônicas do sistema, ou seja, das impedâncias de cada barra do sistema (também chamadas impedâncias próprias) e das impedâncias entre os pontos de injeção e barras predeterminadas do sistema (impedâncias de transferência);

b) O cálculo do fluxo harmônico nas linhas do sistema, fornecendo como resultado final, valores de tensão e corrente para cada frequência harmônica especificada;

c) Determinar pontos de ressonância harmônica (paralela) e barramentos com níveis de distorção de tensão acima dos recomendados por norma.

Os programas computacionais de fluxo harmônico devem ser supridos com as seguintes informações (Parâmetros do Sistema):

a) Ordens harmônicas a serem estudadas, frequência nominal do sistema;

b) Parâmetros de Linhas de Transmissão, Distribuição e Cabos Alimentadores, Transformadores, Bancos de Capacitores, Reatores, Filtros, Cargas Shunt;

c) Parâmetros de Geradores, Compensadores Síncronos;

d) A geração harmônica existente no sistema em estudo.

Para cada ordem harmônica, o programa constrói, a partir dos dados de entrada, uma matriz admitância complexa e armazena na forma de vetor. A seguir é utilizada uma técnica para resolução de equações matriciais, sem que haja a necessidade da inversão desta matriz. Esse procedimento facilita bastante a solução destas equações.

Tal técnica, denominada de "Eliminação de Gauss", aplica transformações elementares na matriz admitância e no vetor independente, reduzindo tal matriz à matriz unidade e transformando este vetor independente em vetor solução.

A "Eliminação de Gauss" promove um ganho bastante significativo no que se refere ao tempo computacional de processamento, principalmente para grandes sistemas com um elevado número de barramentos e de linhas (ramos).

3.3 Características do Programa PQF

Para a utilização do programa computacional de fluxo harmônico PQF, os diversos componentes dos sistemas elétricos foram implementados intrinsecamente, através dos vários modelos existentes na literatura especializada para cada um destes componentes. Assim sendo temos:

- ✓ Transformadores: 05 Modelos;
- ✓ Geradores: 04 Modelos;
- ✓ Filtros: 05 Modelos;
- ✓ Cargas: 03 Modelos.

Quanto a questão da injeção de componentes harmônicas, além do programa admitir a incorporação de correntes e/ou tensões harmônicas geradas, extraídas através de medições em campo, o mesmo permite a simulação de fontes geradoras de harmônicos (cargas elétricas especiais), ou seja, permite obter o conteúdo harmônico gerado por uma determinada carga não-linear sem a necessidade de medições em campo.

Estas fontes, responsáveis pela injeção harmônica no sistema, são simuladas a partir dos parâmetros e condições operativas definidas para este tipo de carga, tais como:

- ✓ Sistemas Conversores Controlados: Podendo conter um ou mais conversores de 6 pulsos;
- ✓ Sistemas Conversores Semi-Controlados: Também podendo conter um ou mais conversores de 6 pulsos individualmente representados;
- ✓ Fornos à Arco: Cujos os harmônicos são gerados através de processos estatísticos;
- ✓ Reatores Controlados a Tiristores (RCT): Podendo-se representar sistemas com qualquer número de pulsos;
- ✓ Reatores a Núcleo Saturado (RNS): Representando-se aos arranjos Twin-Triple.

Os dados de entrada estão associados aos parâmetros do sistema na frequência fundamental. Entre cada nó e o neutro, fontes geradoras de tensão ou corrente harmônica podem ser aplicadas. Cada fonte é especificada através da listagem de suas componentes harmônicas. Em nós (barras) onde existam cargas especiais geradoras de harmônicas (Conversores, Semi-Conversores, Fornos à Arco, RCT's e

RNS's) devem ser fornecidos ao sistema os dados de tais cargas, de modo a permitir o cálculo das componentes harmônicas geradas.

a) A tensão harmônica em cada nó (barra) especificado.

b) A corrente harmônica em cada ramo (linha) especificado.

c) As distorções harmônicas de tensão e corrente em cada nó ou ramo, respectivamente.

Como resultados opcionais tem-se ainda:

a) A impedância própria em cada ponto de injeção;

b) A impedância de transferência entre um ponto de injeção determinado e um nó (barra) desejado;

c) Um espectro gráfico tridimensional que fornece a amplitude de tensão e/ou corrente harmônica, em função da ordem harmônica e das barras do sistema;

d) Curva da Impedância em função frequência.

Limites Operacionais:

a) Número máximo de nós (barras): 200;

b) Número máximo de ramos (linhas): 400;

c) Máxima ordem harmônica: 50;

d) Número máximo de pontos de injeção: 25.

3.4 Processo Matemático:

A partir da entrada dos dados de um determinado sistema elétrico de potência com "n" barras e "m" pontos de injeção, para estudos de fluxo harmônico, os programas computacionais iniciam o processamento montando, para cada ordem harmônica, uma equação matricial do tipo:

$$[Y]_h x [V]_h = [I]_h$$

Onde:

[V]h: Vetor de tensões harmônicas nas barras do sistema, p/ cada ordem h;

[Y]h: Matriz admitância nodal, para cada ordem h;

[I]h: Vetor injeção de correntes harmônicas para cada ordem h.

Uma outra forma de se expressar a equação matricial acima é dado pela seguinte expressão abaixo:

$$\begin{vmatrix} Y11 & Y12 & Y13 & ... & Y1n \\ Y21 & Y22 & Y23 & ... & Y2n \\ Y31 & Y32 & Y33 & ... & Y3n \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ Yn1 & Yn2 & Yn3 & ... & Ynn \end{vmatrix}_h \bullet \begin{vmatrix} Vb1 \\ Vb2 \\ Vb3 \\ . \\ . \\ . \\ Vnn \end{vmatrix}_h = \begin{vmatrix} Ib1 \\ Ib2 \\ Ib3 \\ . \\ . \\ . \\ Ibn \end{vmatrix}_h$$

Onde:

Vb1, Vb2, ..., Vbn: Tensões harmônicas nas barras do sistema elétrico;

Y11, Y22, ..., Ynn: Admitâncias próprias de cada barra do sistema;

Y12, Y13, ..., Ymn: Admitâncias entre as barras do sistema;

h: Ordem harmônica em questão.

Deve ser observado que os valores de corrente para as barras onde não existem pontos de injeção harmônica deverão ser nulos. Uma das maneiras de se resolver o sistema apresentado na equação matricial acima, ocorre através da obtenção da Matriz Inversa diretamente. Isto, no entanto, seria impraticável quando a matriz Y possuir dimensões elevadas. Essa dificuldade decorre do fato de que, apesar da matriz Y ser geralmente esparsa nos problemas relacionados com sistemas elétricos, a sua matriz inversa, em geral, é uma matriz cheia.

Tal fato leva, para a solução de sistemas com elevado número de barras e linhas, a um tempo computacional bastante significativo.Para contornar tal problema, adotam-se, em geral, as técnicas de fatoração triangular de matrizes esparsas, utilizadas na resolução de sistemas lineares. Uma das técnicas mais utilizadas se chama "Eliminação de Gauss".

3.4.1 Eliminação De Gauss:

É um dos métodos adotados para solução de equações matriciais semelhantes à acima descrita. Tal método pode ser dividido em três etapas:
1ª Etapa: São zerados os elementos do triângulo inferior da matriz dos coeficientes, ou seja, matriz Y. Isto é conseguido pelas combinações lineares efetuadas nas linhas do sistema matricial, como mostrado a seguir.

$$\begin{vmatrix} Y11 & Y12 & Y13 & \dots & Y1n \\ 0 & Y22 & Y23 & \dots & Y2n \\ 0 & 0 & Y33 & \dots & Y3n \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Ynn \end{vmatrix}_h \bullet \begin{vmatrix} Vb1 \\ Vb2 \\ Vb3 \\ . \\ . \\ . \\ Vnn \end{vmatrix}_h = \begin{vmatrix} Ib1' \\ Ib2' \\ Ib3' \\ . \\ . \\ . \\ Ibn' \end{vmatrix}_h$$

2ª Etapa: Os elementos da diagonal principal, da matriz Y, são feitos iguais a 01, dividindo-se cada elemento da equação pelo elemento correspondente da diagonal principal. Deste procedimento resulta a equação mostrada a seguir:

$$\begin{vmatrix} 1 & Y12 & Y13 & \dots & Y1n \\ 0 & 1 & Y23 & \dots & Y2n \\ 0 & 0 & 1 & \dots & Y3n \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}_h \bullet \begin{vmatrix} Vb1 \\ Vb2 \\ Vb3 \\ . \\ . \\ . \\ Vnn \end{vmatrix}_h = \begin{vmatrix} Ib1'' \\ Ib2'' \\ Ib3'' \\ . \\ . \\ . \\ Ibn'' \end{vmatrix}_h$$

3ª Etapa: Nesta etapa são zerados os elementos do triângulo superior, através de combinações lineares efetuadas nas linhas do sistema de equações. Essa operação transforma a matriz Y numa matriz identidade, conforme ilustrado a seguir:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{vmatrix}_{h} \bullet \begin{vmatrix} Vb1 \\ Vb2 \\ Vb3 \\ . \\ . \\ . \\ Vnn \end{vmatrix}_{h} = \begin{vmatrix} Ib1''' \\ Ib2''' \\ Ib3''' \\ . \\ . \\ . \\ Ibn''' \end{vmatrix}_{h}$$

Portanto, tem-se finalmente como solução da equação matricial inicial, os valores obtidos no vetor independente da acima.

Obtido o vetor de tensões para a ordem harmônica em questão, pode-se agora obter as correntes harmônicas nos ramos, como pode ser visualizado na equação abaixo:

$$I_{h(ij)} = (V_{h(i)} - V_{h(j)}) x (y_{h(ij)})$$

Onde:

Iij: Corrente harmônica do ramo ij;

Vi: Tensão harmônica na barra i;

Vj: Tensão harmônica na barra j;

yij: Admitânica do ramo ij.

Desta forma, são obtidos para todo o sistema em análise as tensões e correntes harmônicas nos barramentos e nos ramos, respectivamente, permitindo uma análise do comportamento do sistema em estudo frente à circulação dos harmônicos no mesmo.

4 RESULTADOS DO FLUXO DE CARGA – COMPATIBILIDADE

Para a realização da modelagem do sistema elétrico do Metrô-DF (Anel Ceilândia Sul/Águas Claras e Anel Brasília Centro/Hípica) admiti-se que os valores de simulação apresentados no relatório de fluxo de carga RT.4/EX.99/00.014. representam a operação real do sistema. Portanto, o resultado das simulações de fluxo de carga no software *PQF* deve ser aproximadamente igual ao relatório supracitado.

A Tabela abaixo apresenta os resultados do fluxo de carga da modelagem do sistema Metrô-DF.

Tabela 11 – Fluxo de Carga nas SEs/PEE do sistema existente do Metrô-DF

SEs/PEEs	P (kW)	Q(kVAr)	S(kVA)	V(kVL-L RMS)	I(ARMS)
SE CEILÂNDIA SUL	10528,88	4397,29	11410,24	13,798	477,08
SE ÁGUAS CLARAS	21692,72	6516,72	22650,19	13,900	940,80
SE BRASILIA CENTRO	5298,72	2789,31	5988,05	13,345	259,04
PEE HÍPICA	12772,22	4221,16	13451,68	13,400	579,58

A tabela acima valida a modelagem das cargas realizadas pelo estudo de fluxo de carga e confirmada pelo estudo de fluxo de harmônios com os modelos existentes em cada um dos softwares utilizados, visto que os valores de potências, tensões e correntes nos PEEs estão aproximadamente iguais ao fluxo de carga apresentado no relatório RT.4/EX.99/00.014.

5 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASOS

As simulações para as configurações em anel existentes contemplam o estudo de harmônicos considerando os casos conforme a Tabela 12 abaixo:

Tabela 12 – Casos de Estudo de Harmônicos

1º Caso	Atual: Sem Filtro
2º Caso	Atual: Com Filtro Sintonizado 5ª, 7ª e 11ª ordem
3º Caso	Futuro: Com Filtro Sintonizado 5ª, 7ª e 11ª ordem
4º Caso	Atual: Sem Filtro Contingência
5º Caso	Atual: Com Filtro Sintonizado 5ª, 7ª e 11ª ordem Contingência
6º Caso	Futuro: Com Filtro Sintonizado 5ª, 7ª e 11ª ordem Contingência

Observação: Para o 3º e 6º Caso, Futuro, considera-se um crescimento de carga de 100%, correspondente a um crescimento de 3,5% ao ano, durante 20 anos.

5.1 Anel Ceilândia Sul/Águas Claras

5.1.1 1º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras: Situação Atual Sem Filtros

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

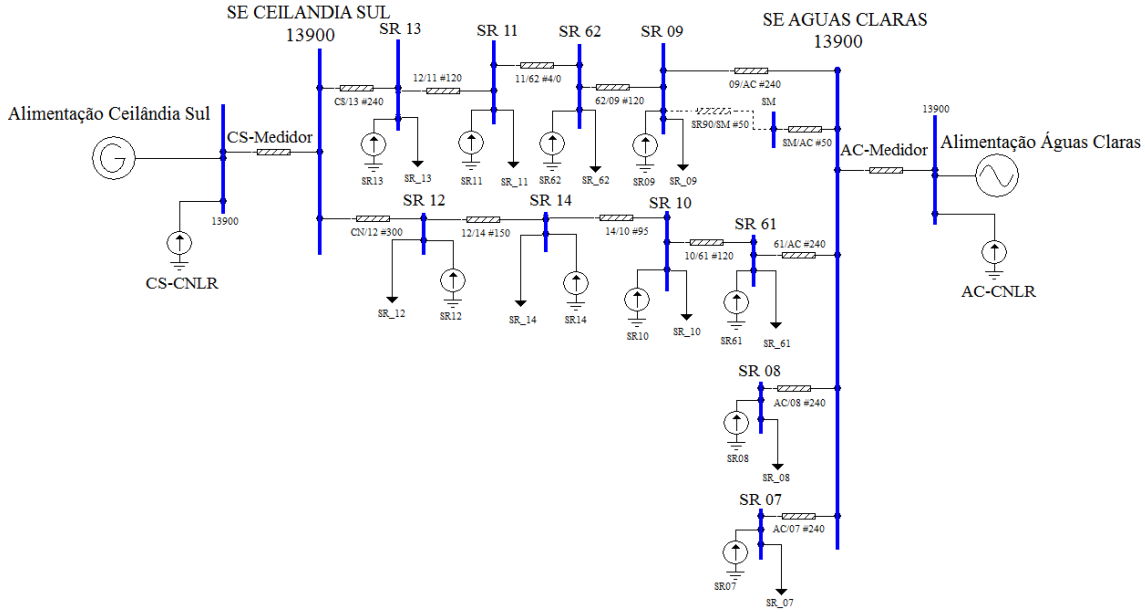


Figura 5 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas, sem filtro.

Onde:
CS-CNLR: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

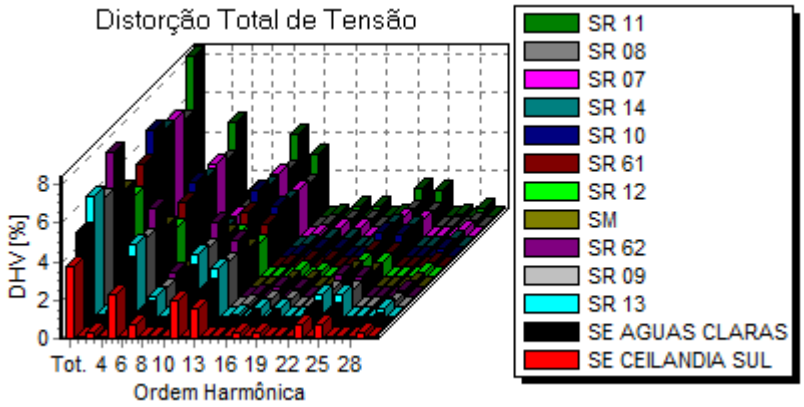
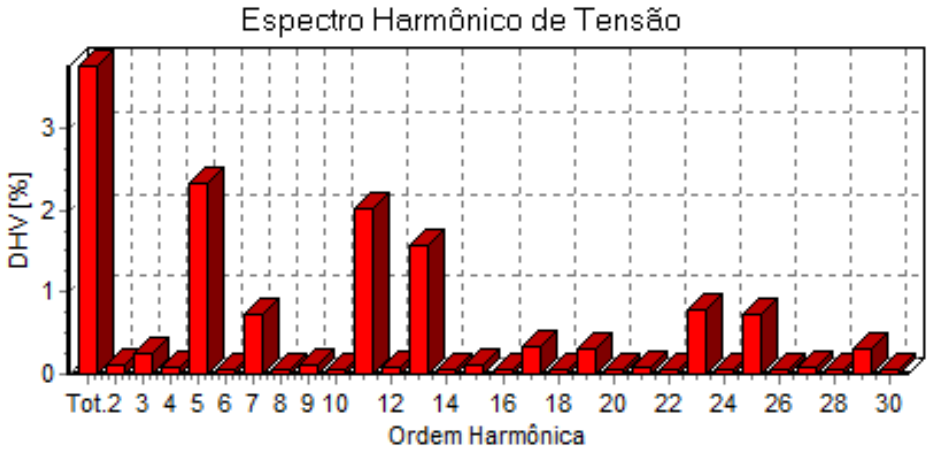


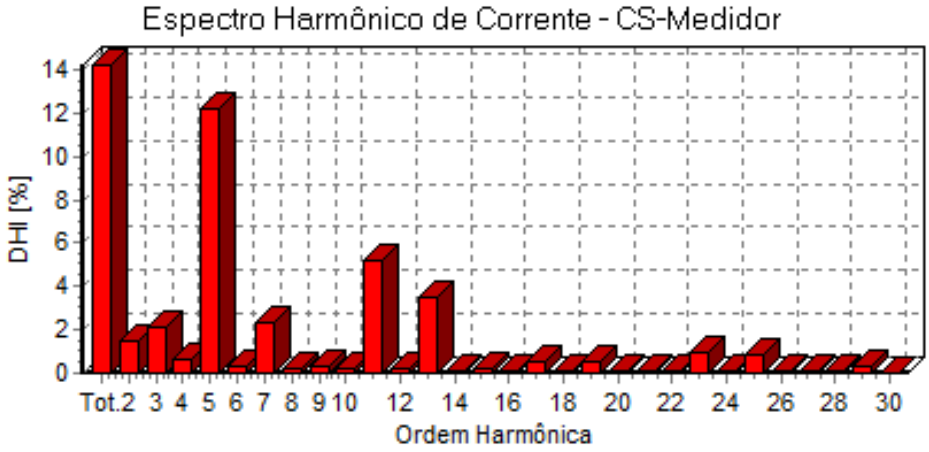
Figura 6 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.1.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 7 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Sem Filtros			
Nome do Elemento:	CS-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13802,67 [V]		
DHVtotal:	3,78 [%]		
Corrente			
Eficaz:	479,27 [A]		
DHItotal:	14,22 [%]		
Potência			
Ativa Total:	10528,59 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,08 [kW]
Reativa Total:	4144,08 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	4199,61 [kVAr]
Aparente Tot.:	11457,98 [kVA]	**Aparente Fund.:**	11335,70 [kVA]
Distorção	1805,75 [kVAd]		
FP Total:	0,919	**FP Fund.:**	0,929

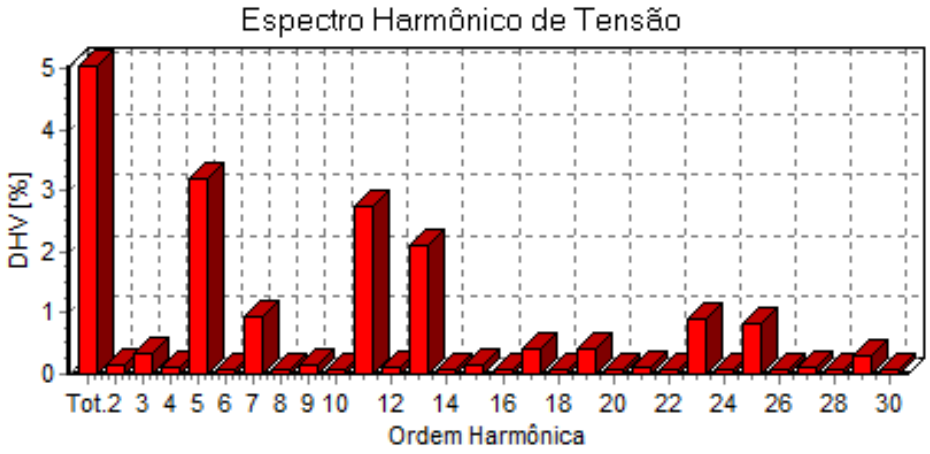
Página 1

Figura 8 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

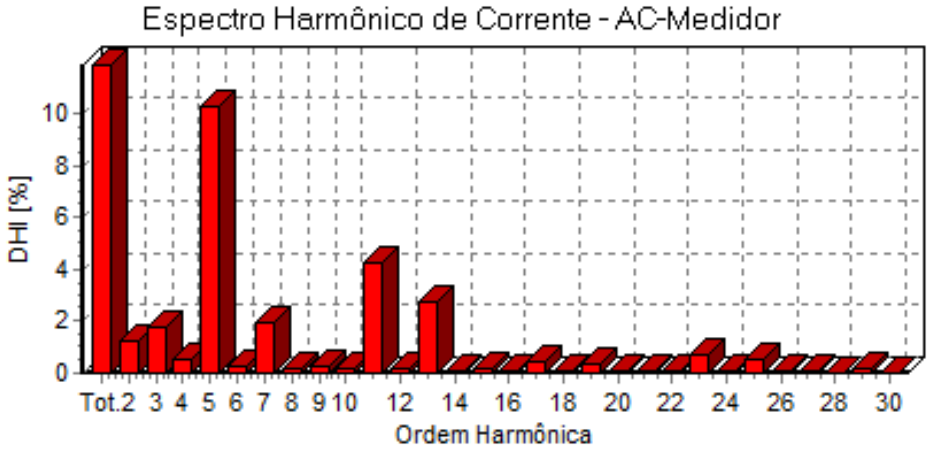
Observa-se que o fator de potência de 0,919 na SE CS está fora dos limites recomendados pelo PRODIST, porém a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 3,78 está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.1.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 9 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Sem Filtros			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13917,76 [V]		
DHVtotal:	5,06 [%]		
Corrente			
Eficaz:	943,27 [A]		
DHItotal:	11,88 [%]		
Potência			
Ativa Total:	21695,62 [kW]	**Ativa Fund.:**	21696,68 [kW]
Reativa Total:	6025,33 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	6148,89 [kVAr]
Aparente Tot.:	22738,71 [kVA]	**Aparente Fund.:**	22551,16 [kVA]
Distorção	3169,29 [kVAd]		
FP Total:	0,954	**FP Fund.:**	0,962

Figura 10 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência de 0,954 na SE AC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 5,06% está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.2 2º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras: Situação Atual Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

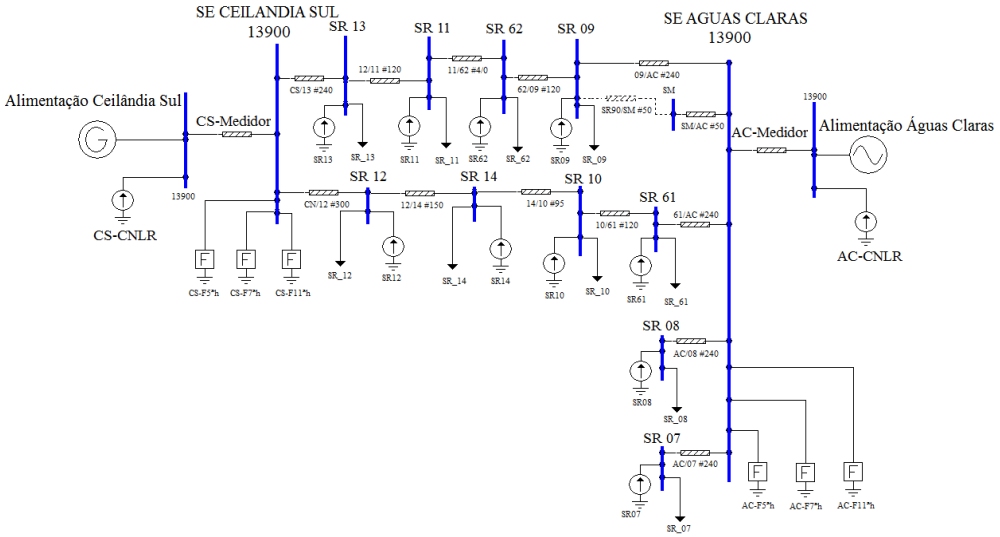


Figura 11 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros.

Onde:
CS-CNLR: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais;
CS-F5ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Quinta harmônica;
CS-F7ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Sétima harmônica;
CS-F11ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Décima Primeira harmônica;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais;
AC-F5ªh: Águas Claras – Filtro de Quinta harmônica;
AC-F7ªh: Águas Claras – Filtro de Sétima harmônica;
AC-F11ªh: Águas Claras – Filtro de Décima Primeira harmônica;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

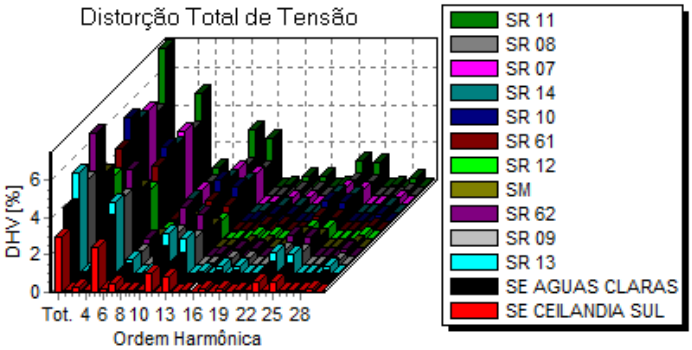
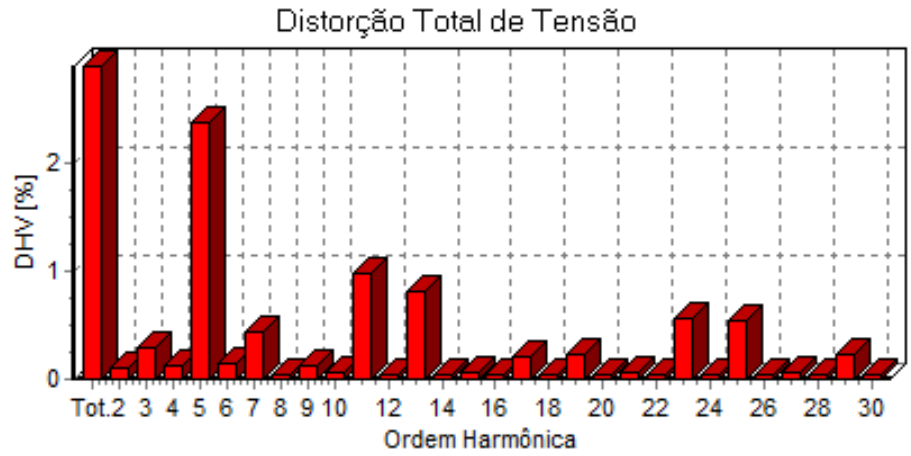


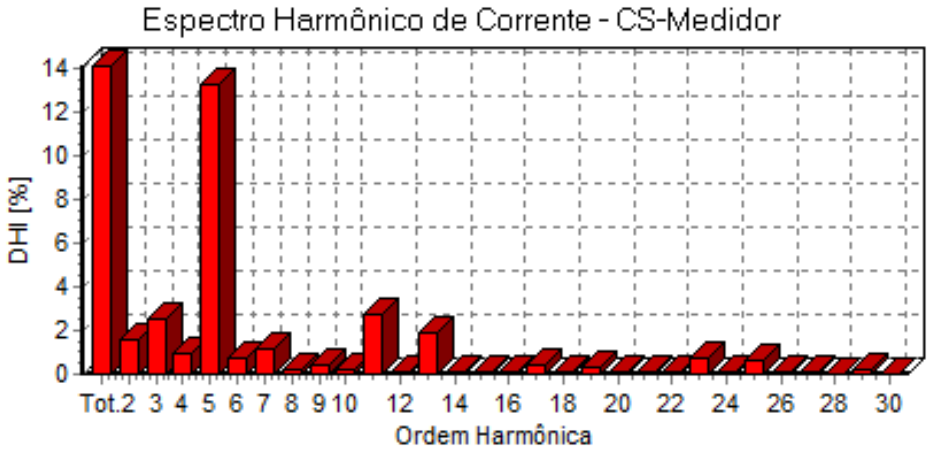
Figura 12 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.2.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 13 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	CS-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13905,94 [V]		
DHVtotal:	2,92 [%]		
Corrente			
Eficaz:	450,50 [A]		
DHItotal:	14,24 [%]		
Potência			
Ativa Total:	10528,64 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,06 [kW]
Reativa Total:	2065,13 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2107,02 [kVAr]
Aparente Tot.:	10850,71 [kVA]	**Aparente Fund.:**	10737,81 [kVA]
Distorção	1618,94 [kVAd]		
FP Total:	0,970	**FP Fund.:**	0,981

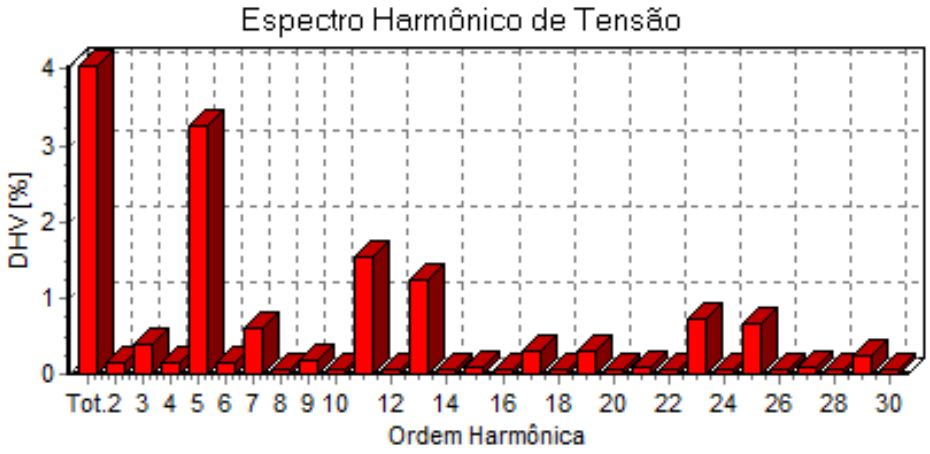
Página 1

Figura 14 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

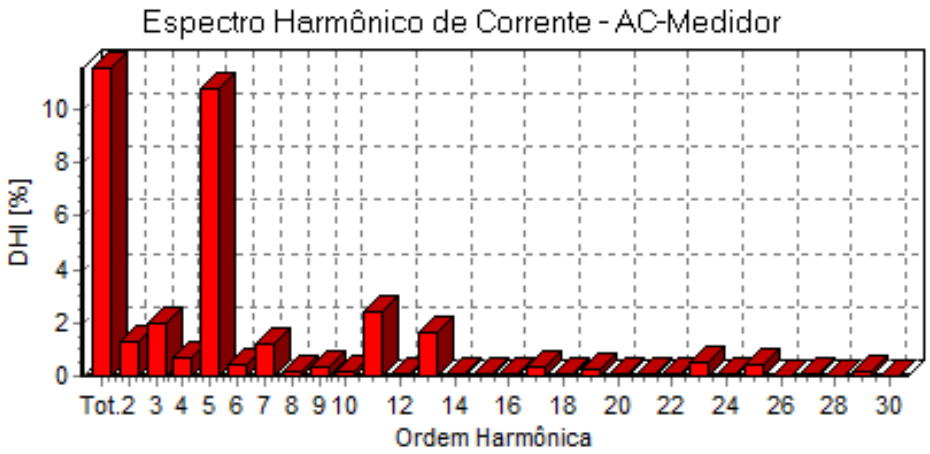
Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,970 na SE CS e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 2,92% está menor comparado com o caso ATUAL SEM FILTRO e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.2.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 15 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13911,36 [V]		
DHVtotal:	4,04 [%]		
Corrente			
Eficaz:	916,04 [A]		
DHItotal:	11,54 [%]		
Potência			
Ativa Total:	21721,53 [kW]	**Ativa Fund.:**	21722,38 [kW]
Reativa Total:	2754,97 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2850,73 [kVAr]
Aparente Tot.:	22072,11 [kVA]	**Aparente Fund.:**	21908,64 [kVA]
Distorção	2786,24 [kVAd]		
FP Total:	0,984	**FP Fund.:**	0,991

Figura 16 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,984 na SE AC e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 4,04% está menor comparado com o caso ATUAL SEM FILTRO e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.3 3º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras: Situação Futura Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel. Para este caso, considera-se uma perspectiva de crescimento de cargas residenciais de 100%.

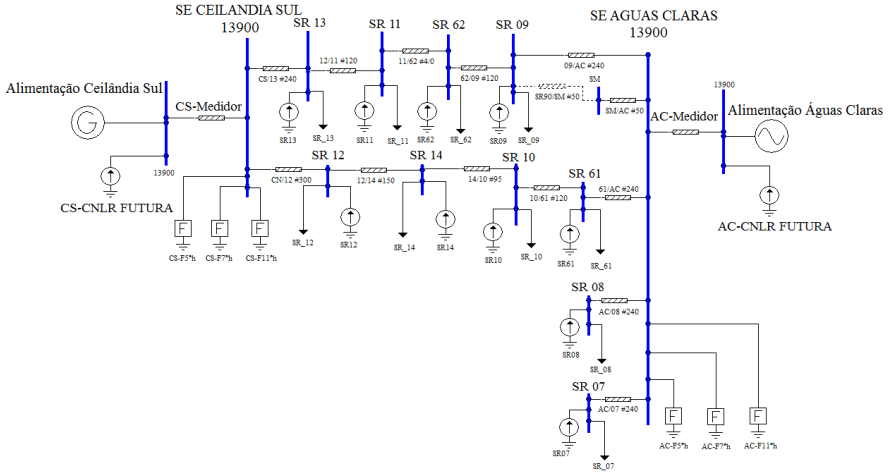


Figura 17 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros.

Onde:
CS-CNLR FUTURA: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
CS-F5ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Quinta harmônica;
CS-F7ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Sétima harmônica;
CS-F11ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Décima Primeira harmônica;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR FUTURA: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
AC-F5ªh: Águas Claras – Filtro de Quinta harmônica;
AC-F7ªh: Águas Claras – Filtro de Sétima harmônica;
AC-F11ªh: Águas Claras – Filtro de Décima Primeira harmônica;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

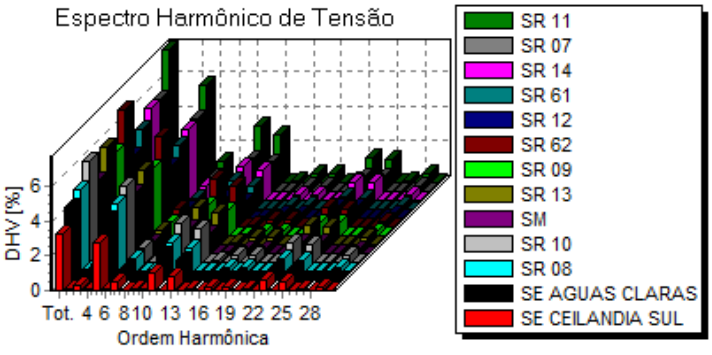
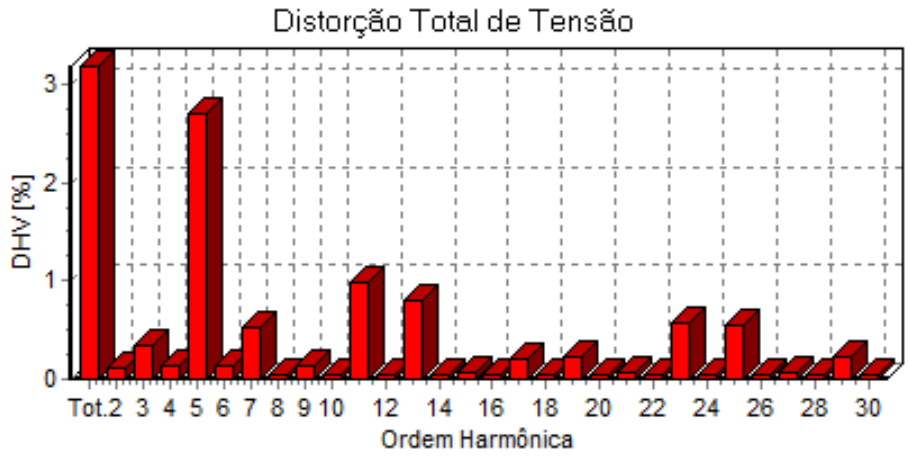


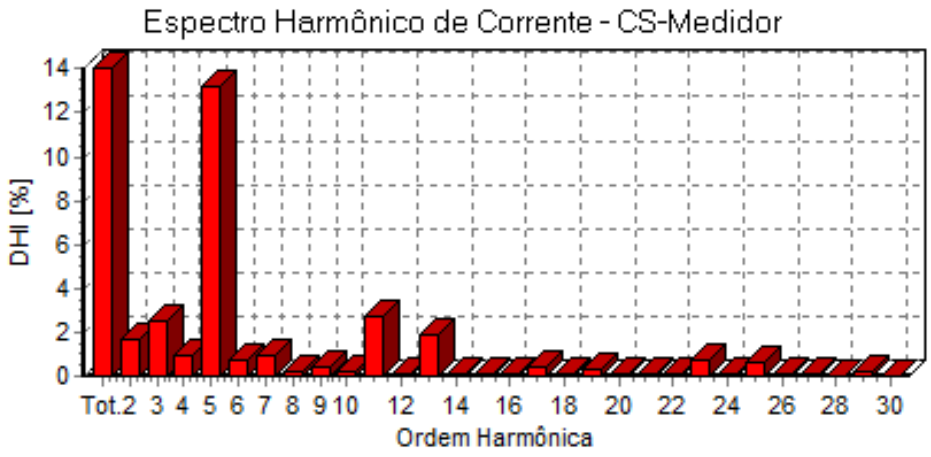
Figura 18 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.3.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 19 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Futuro Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	CS-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13907,14 [V]		
DHVtotal:	3,21 [%]		
Corrente			
Eficaz:	450,43 [A]		
DHItotal:	14,13 [%]		
Potência			
Ativa Total:	10528,25 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,08 [kW]
Reativa Total:	2060,81 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2107,04 [kVAr]
Aparente Tot.:	10850,01 [kVA]	**Aparente Fund.:**	10737,84 [kVA]
Distorção	1622,23 [kVAd]		
FP Total:	0,970	**FP Fund.:**	0,981

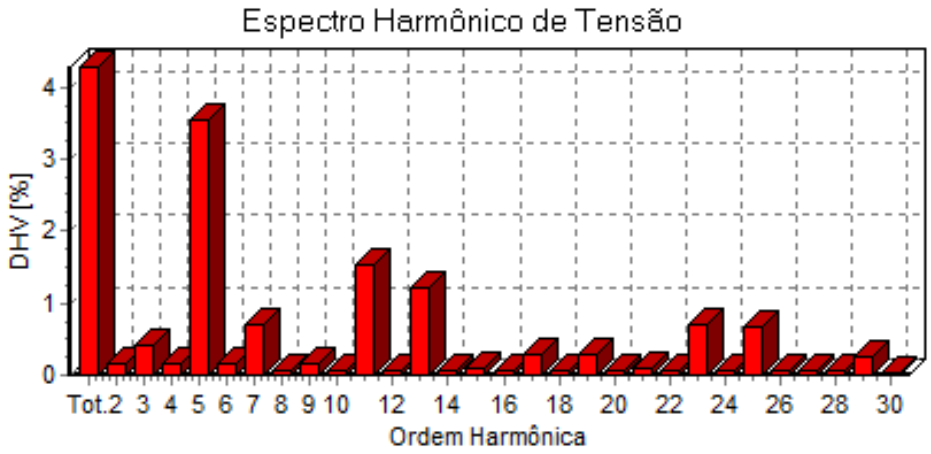
Página 1

Figura 20 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

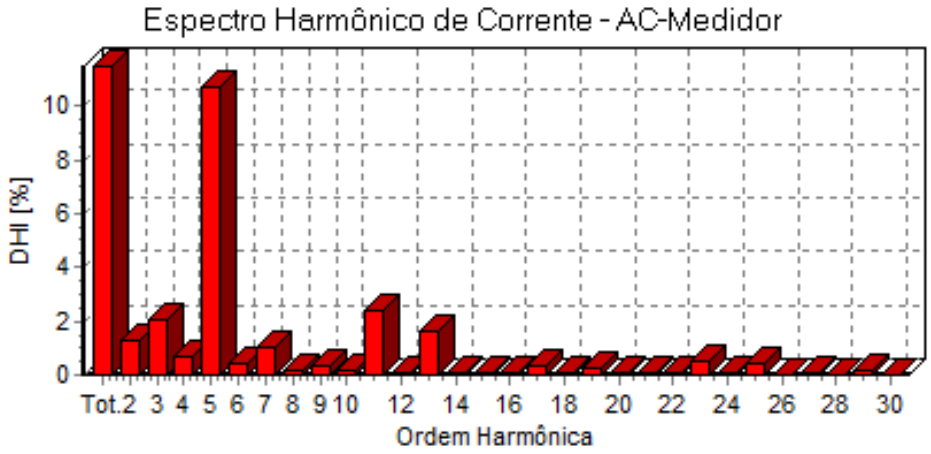
Observa-se que o fator de potência indutivo de 0,970 na SE CS está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas na SE AC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 3,21% e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.3.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 21 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Futuro Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13912,75 [V]		
DHVtotal:	4,28 [%]		
Corrente			
Eficaz:	915,99 [A]		
DHItotal:	11,50 [%]		
Potência			
Ativa Total:	21721,26 [kW]	**Ativa Fund.:**	21722,38 [kW]
Reativa Total:	2748,56 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2850,73 [kVAr]
Aparente Tot.:	22073,26 [kVA]	**Aparente Fund.:**	21908,64 [kVA]
Distorção	2803,74 [kVAd]		
FP Total:	0,984	**FP Fund.:**	0,991

Figura 22 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,984 na SE AC e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas na SE AC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 4,28% e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.4 4º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras Contingência: Situação Atual Sem Filtros

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

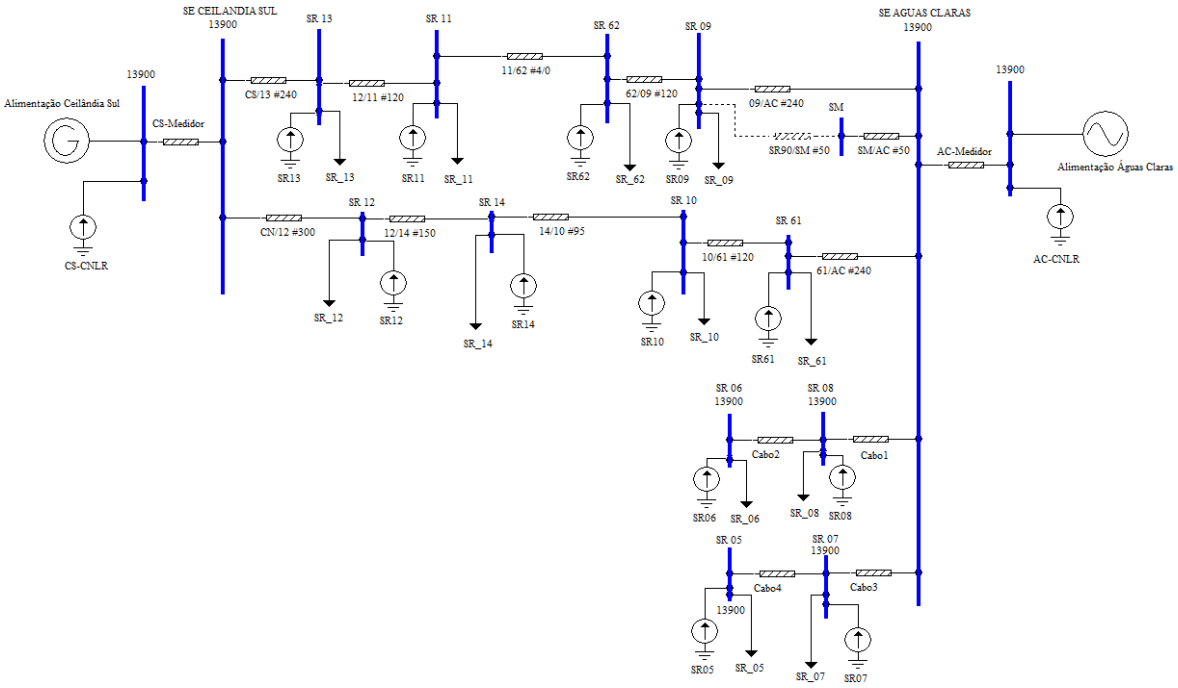


Figura 23 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas, sem filtro.

Onde:
CS-CNLR: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

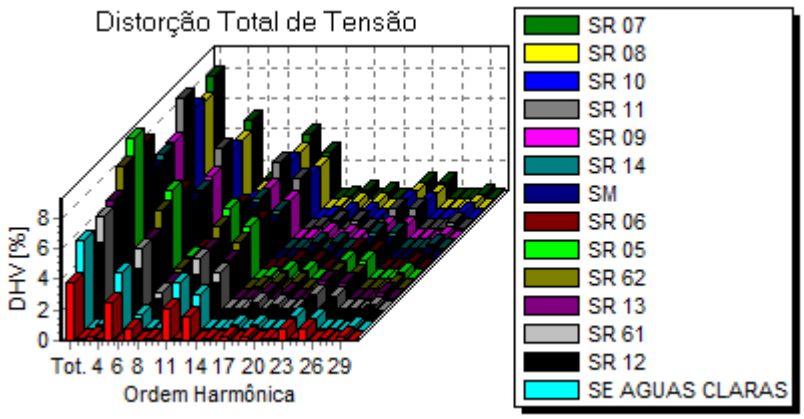
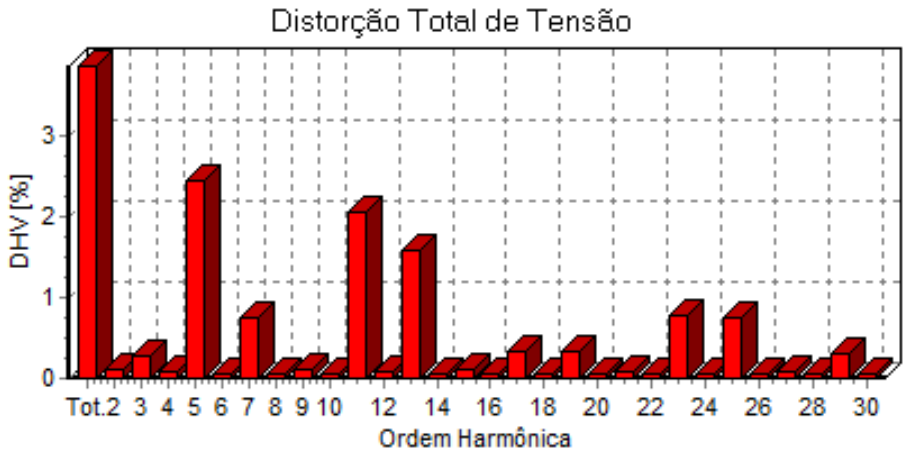


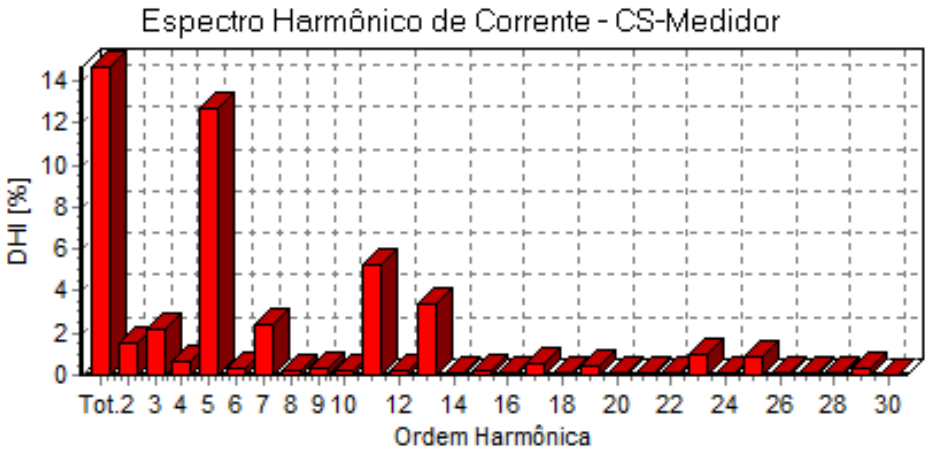
Figura 24 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.4.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 25 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Contingência SR05, SR06			
Nome do Elemento:	CS-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13910,31 [V]		
DHVtotal:	3,85 [%]		
Corrente			
Eficaz:	485,75 [A]		
DHItotal:	14,65 [%]		
Potência			
Ativa Total:	10528,60 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,09 [kW]
Reativa Total:	4739,51 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	4799,10 [kVAr]
Aparente Tot.:	11703,45 [kVA]	**Aparente Fund.:**	11571,22 [kVA]
Distorção	1912,21 [kVAd]		
FP Total:	0,900	**FP Fund.:**	0,910

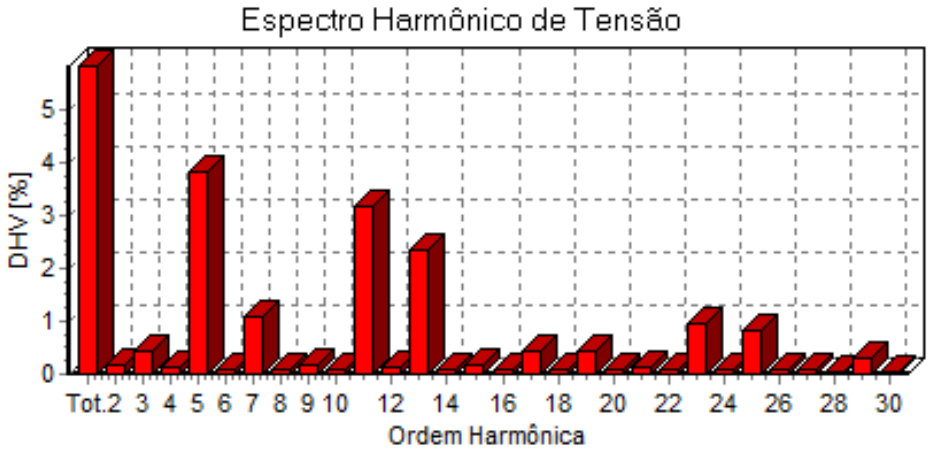
Página 1

Figura 26 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

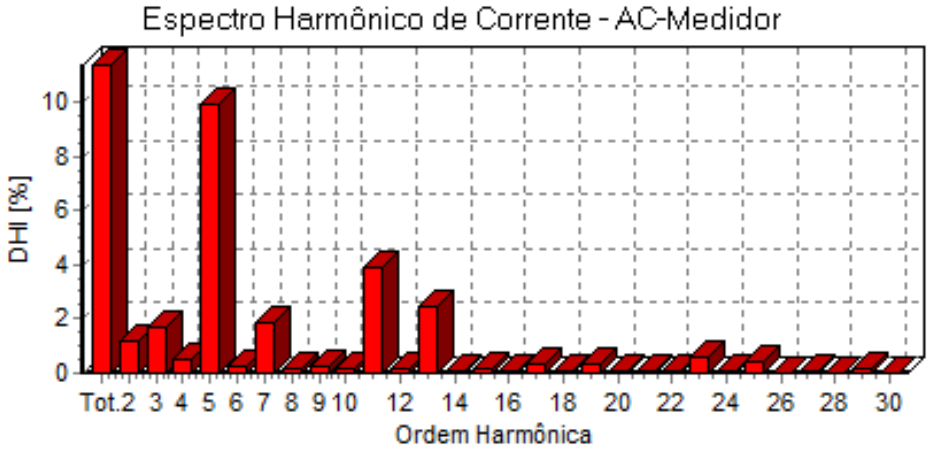
Observa-se que o fator de potência de 0,90 na SE CS está fora dos limites recomendados pelo PRODIST, porém a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 3,85 está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.4.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 27 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Contingência SR05, SR06			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13923,59 [V]		
DHVtotal:	5,83 [%]		
Corrente			
Eficaz:	1174,94 [A]		
DHItotal:	11,36 [%]		
Potência			
Ativa Total:	27101,81 [kW]	**Ativa Fund.:**	27102,80 [kW]
Reativa Total:	7273,30 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	7443,90 [kVAr]
Aparente Tot.:	28335,39 [kVA]	**Aparente Fund.:**	28106,47 [kVA]
Distorção	3935,14 [kVAd]		
FP Total:	0,956	**FP Fund.:**	0,964

Figura 28 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência de 0,956 na SE AC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Porém, a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 5,83% está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.5 5º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras Contingência: Situação Atual Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

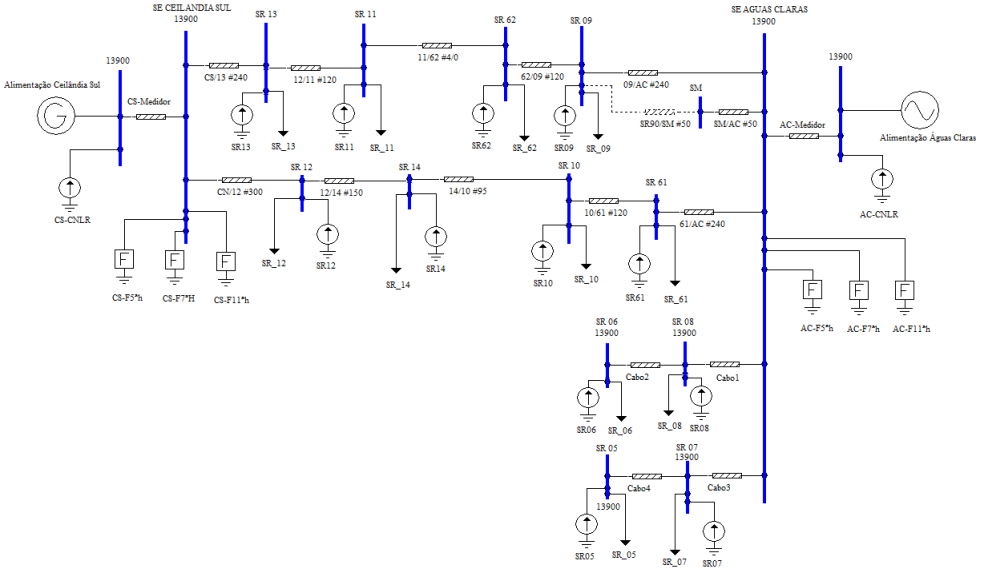


Figura 29 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros.

Onde:
CS-CNLR: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais;
CS-F5ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Quinta harmônica;
CS-F7ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Sétima harmônica;
CS-F11ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Décima Primeira harmônica;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais;
AC-F5ªh: Águas Claras – Filtro de Quinta harmônica;
AC-F7ªh: Águas Claras – Filtro de Sétima harmônica;
AC-F11ªh: Águas Claras – Filtro de Décima Primeira harmônica;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

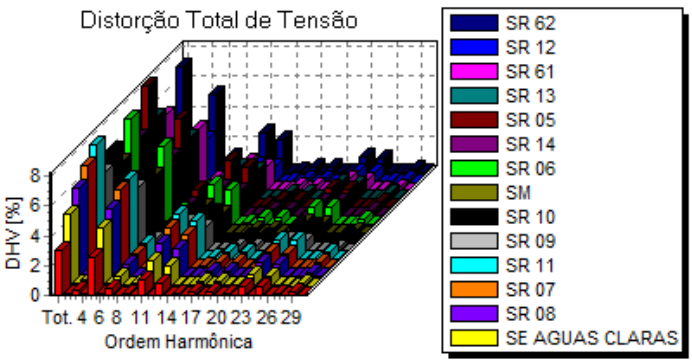
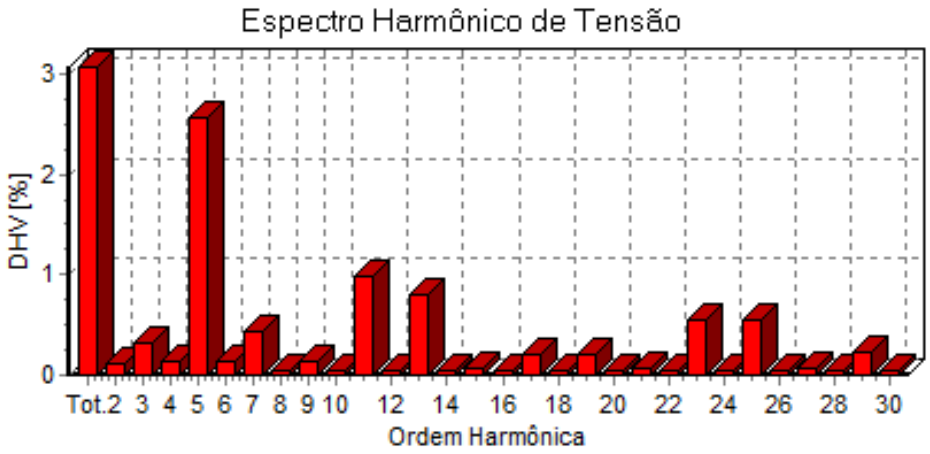


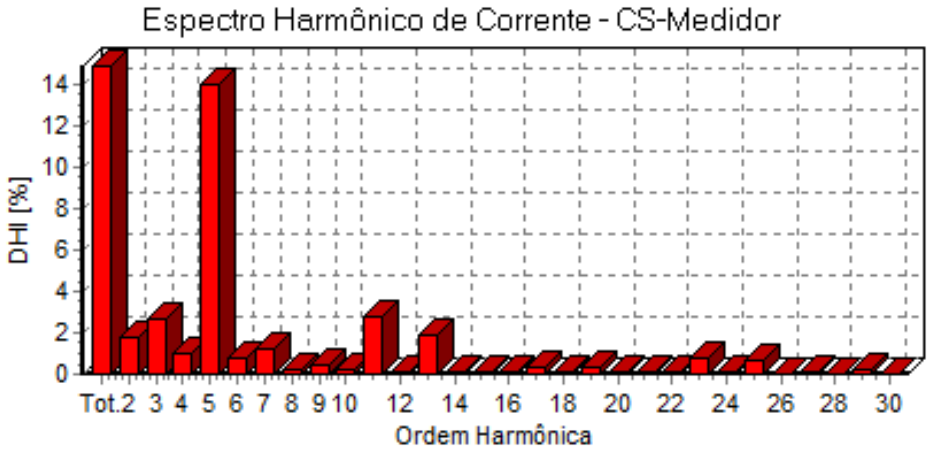
Figura 30 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.5.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 31 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ªh - Contingência SR05, SR06

Nome do Elemento: CS-Medidor

Tensão

Eficaz:	13906,56 [V]		
DHVtotal:	3,07 [%]		

Corrente

Eficaz:	450,92 [A]		
DHItotal:	14,88 [%]		

Potência

Ativa Total:	10528,61 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,08 [kW]
Reativa Total:	2060,66 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2107,04 [kVAr]
Aparente Tot.:	10861,22 [kVA]	**Aparente Fund.:**	10737,83 [kVA]
Distorção	1693,56 [kVAd]		
FP Total:	0,969	**FP Fund.:**	0,981

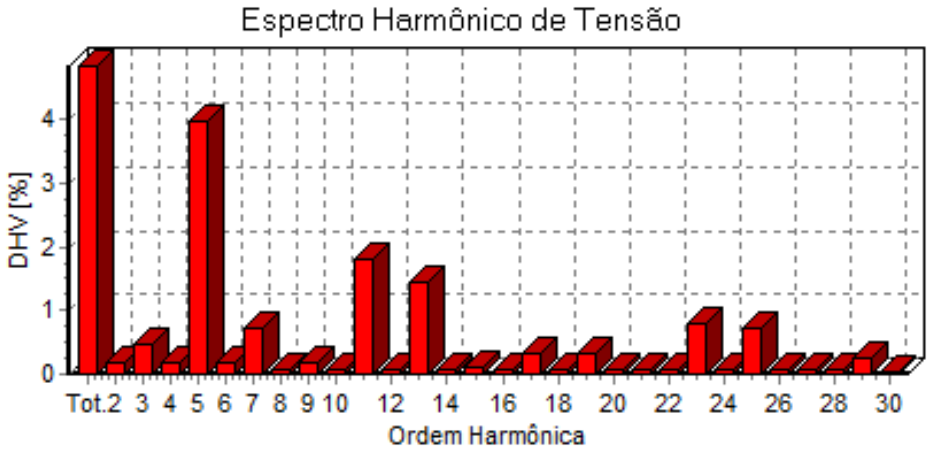
Página 1

Figura 32 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

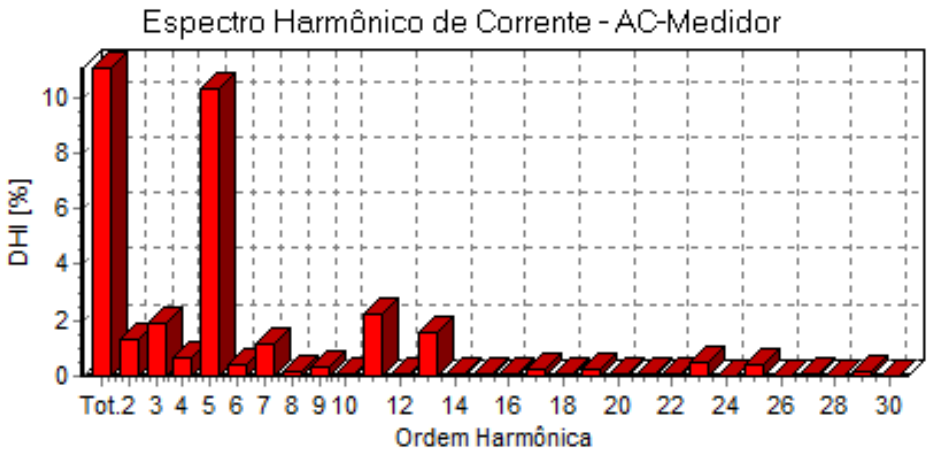
Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,964 na SE CS e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 3,07% e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.5.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 33 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ªh - Contingência SR05, SR06			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13916,21 [V]		
DHVtotal:	4,83 [%]		
Corrente			
Eficaz:	1150,52 [A]		
DHItotal:	11,05 [%]		
Potência			
Ativa Total:	27120,49 [kW]	**Ativa Fund.:**	27121,29 [kW]
Reativa Total:	4598,12 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	4736,52 [kVAr]
Aparente Tot.:	27731,56 [kVA]	**Aparente Fund.:**	27531,78 [kVA]
Distorção	3517,87 [kVAd]		
FP Total:	0,978	**FP Fund.:**	0,985

Figura 34 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,978 na SE AC e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 4,83% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.6 6º Caso – Anel Ceilândia Sul/Águas Claras Contingência: Situação Futura Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel. Para este caso, considera-se uma perspectiva de crescimento de cargas residenciais de 100%.

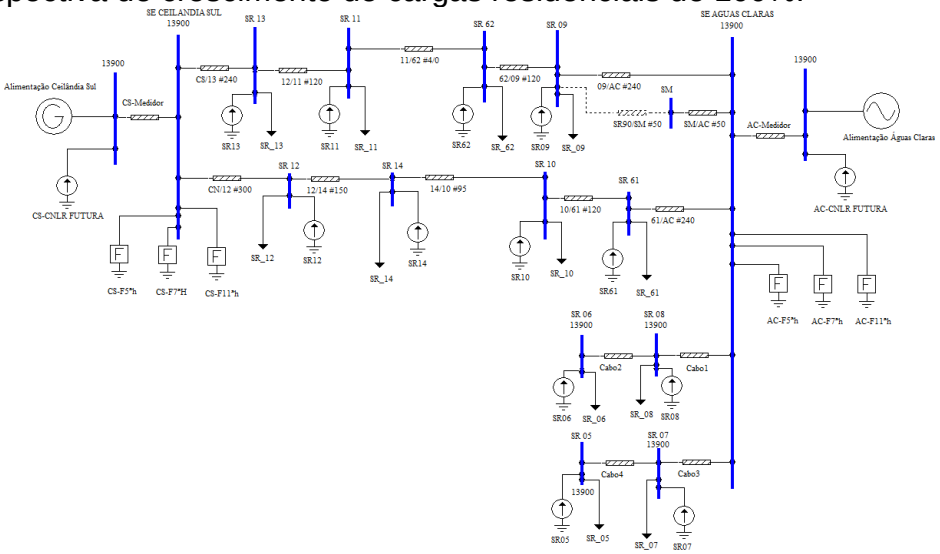


Figura 35 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas e filtros.

Onde:
CS-CNLR FUTURA: Ceilândia Sul – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
CS-F5ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Quinta harmônica;
CS-F7ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Sétima harmônica;
CS-F11ªh: Ceilândia Sul – Filtro de Décima Primeira harmônica;
CS-Medidor: Ceilândia Sul – Ponto de Medição;
AC-CNLR FUTURA: Águas Claras – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
AC-F5ªh: Águas Claras – Filtro de Quinta harmônica;
AC-F7ªh: Águas Claras – Filtro de Sétima harmônica;
AC-F11ªh: Águas Claras – Filtro de Décima Primeira harmônica;
AC-Medidor: Águas Claras – Ponto de Medição;

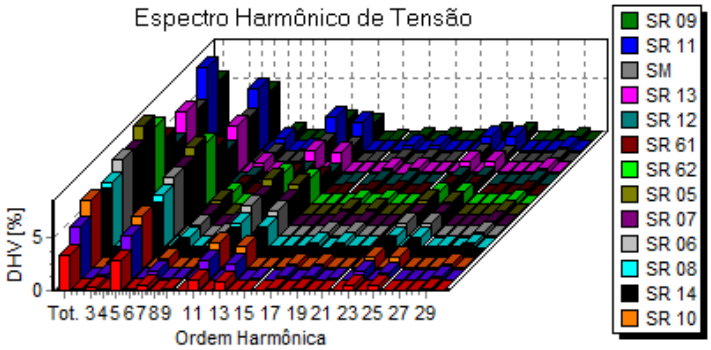
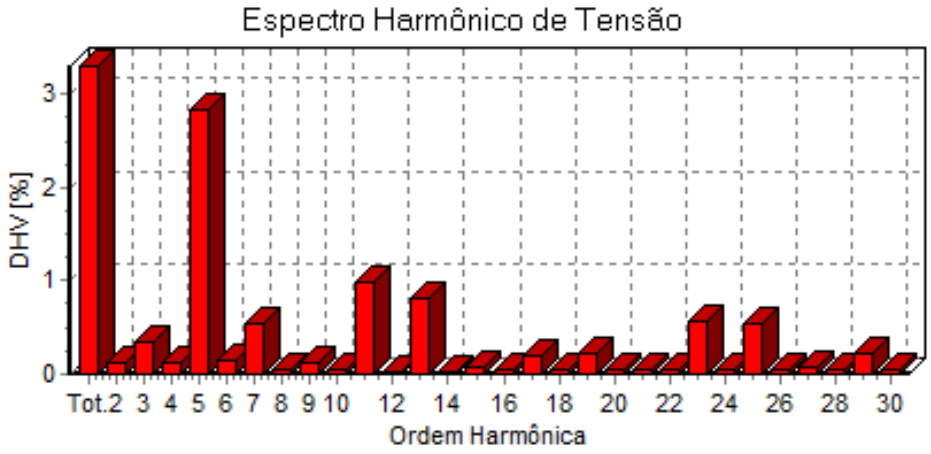


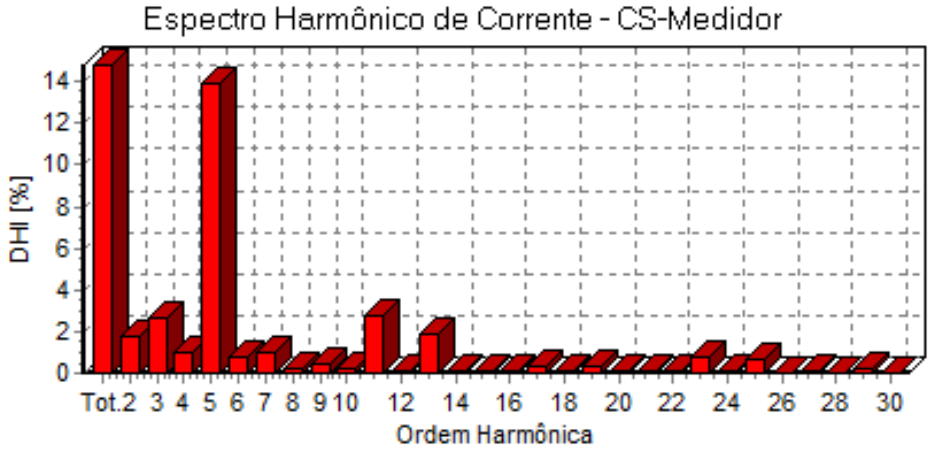
Figura 36 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.1.6.1 Resultados na SE Ceilândia Sul

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE CS e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 37 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ªh - Contingência SR05, SR06			
Nome do Elemento:	CS-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13907,56 [V]		
DHVtotal:	3,30 [%]		
Corrente			
Eficaz:	450,86 [A]		
DHItotal:	14,79 [%]		
Potência			
Ativa Total:	10528,38 [kW]	**Ativa Fund.:**	10529,08 [kW]
Reativa Total:	2057,09 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2107,03 [kVAr]
Aparente Tot.:	10860,56 [kVA]	**Aparente Fund.:**	10737,83 [kVA]
Distorção	1695,09 [kVAd]		
FP Total:	0,969	**FP Fund.:**	0,981

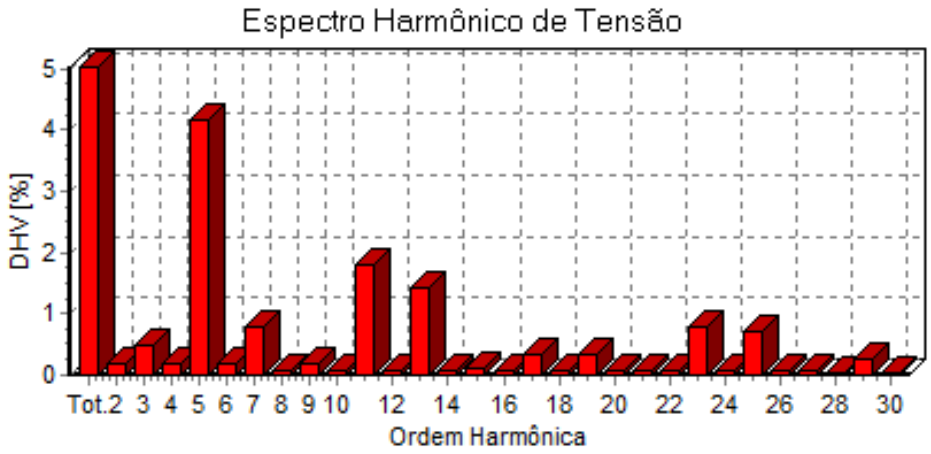
Página 1

Figura 38 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

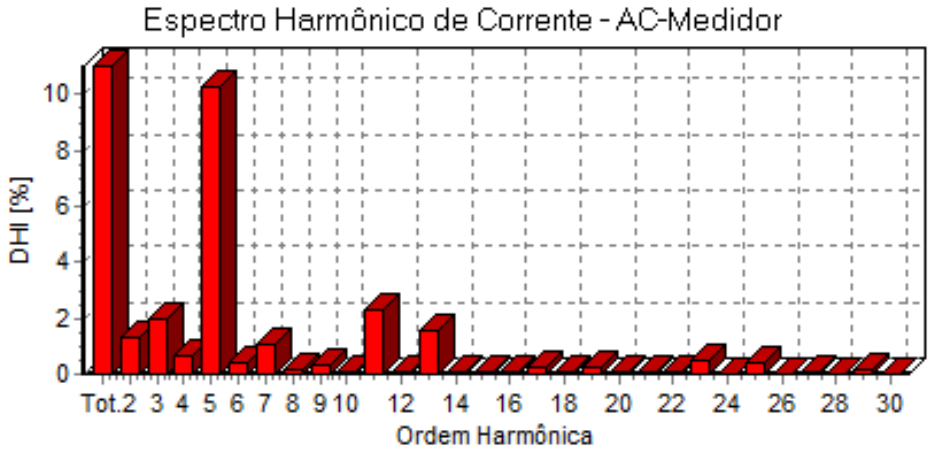
Observa-se que o fator de potência indutivo de 0,969 na SE CS está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas na SE AC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 3,30% e está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.1.6.2 Resultados na SE Águas Claras

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE AC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 39 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente CS_AC - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ªh - Contingência SR05, SR06			
Nome do Elemento:	AC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13917,51 [V]		
DHVtotal:	5,02 [%]		
Corrente			
Eficaz:	1150,47 [A]		
DHItotal:	11,01 [%]		
Potência			
Ativa Total:	27120,71 [kW]	**Ativa Fund.:**	27121,29 [kW]
Reativa Total:	4592,18 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	4736,52 [kVAr]
Aparente Tot.:	27733,12 [kVA]	**Aparente Fund.:**	27531,78 [kVA]
Distorção	3536,21 [kVAd]		
FP Total:	0,978	**FP Fund.:**	0,985

Figura 40 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência está indutivo, com valor de 0,978 na SE AC e está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas na SE AC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 5,02% e está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014, mas tal situação não é de responsabilidade do Metrô-DF, pois as cargas não lineares que aumentarão ao longo dos anos são cargas da CEB.

5.2 Anel Brasília Centro/Hípica

5.2.1 1º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica: Situação Atual Sem Filtros

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

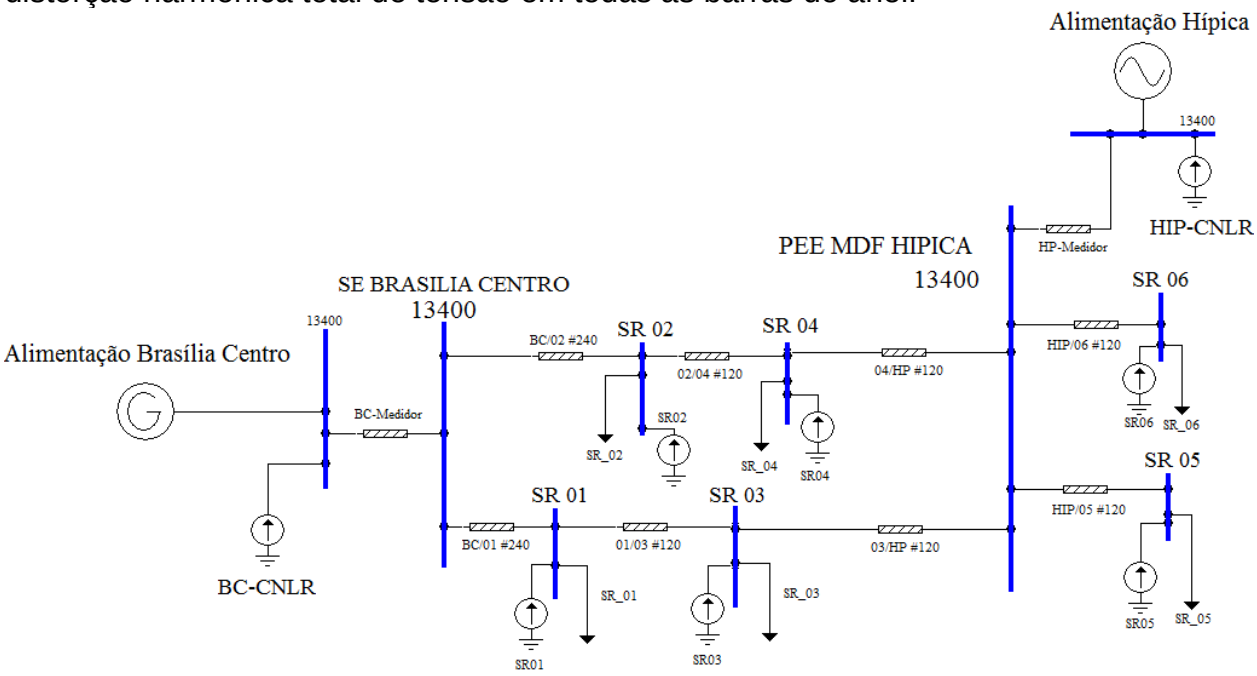


Figura 41 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais;
HP-CNLR: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais;

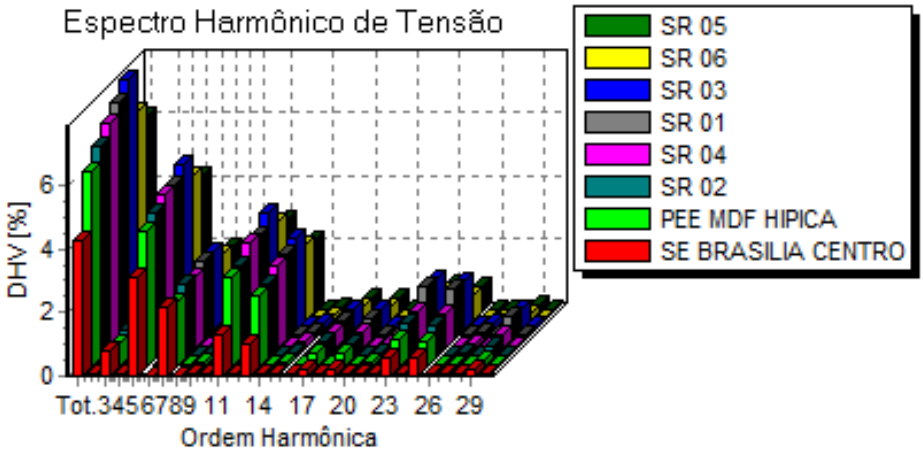
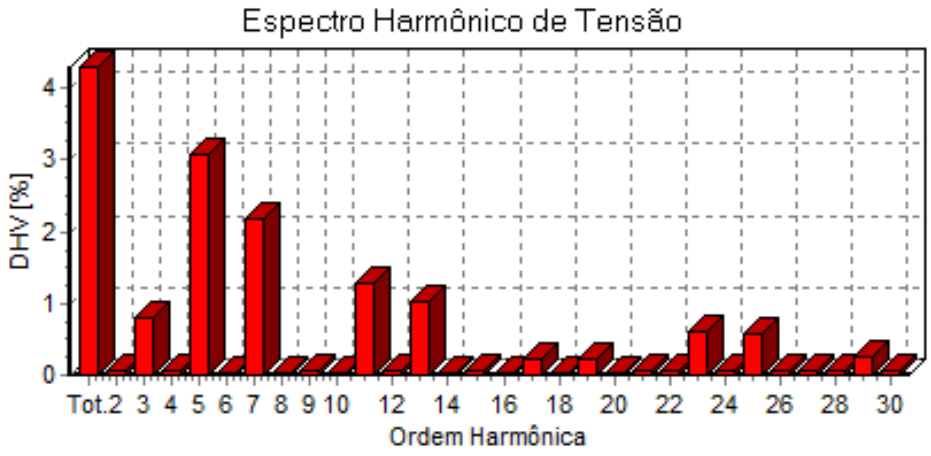


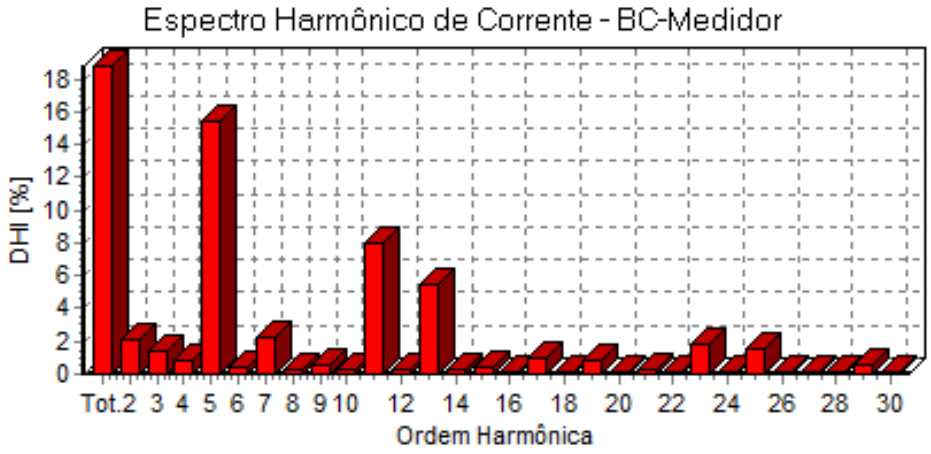
Figura 42 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.1.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 43 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Sem Filtros			
Nome do Elemento:	BC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13357,54 [V]		
DHVtotal:	4,29 [%]		
Corrente			
Eficaz:	259,81 [A]		
DHItotal:	18,78 [%]		
Potência			
Ativa Total:	5303,35 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,08 [kW]
Reativa Total:	2558,04 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2599,60 [kVAr]
Aparente Tot.:	6011,05 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5902,39 [kVA]
Distorção	1209,80 [kVAd]		
FP Total:	0,882	**FP Fund.:**	0,898

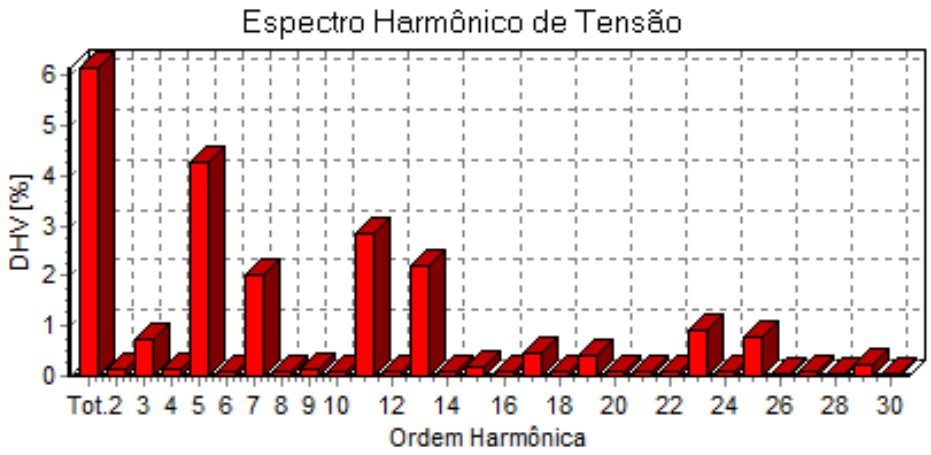
Página 1

Figura 44 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

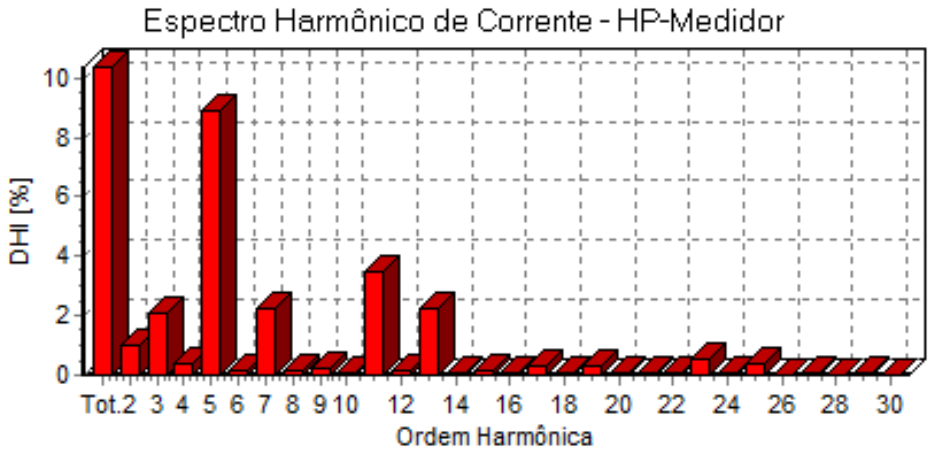
Observa-se que o fator de potência de 0,882 na SE BC está fora dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 4,29% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.1.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 45 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Sem Filtros			
Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13425,29 [V]		
DHVtotal:	6,15 [%]		
Corrente			
Eficaz:	575,34 [A]		
DHItotal:	10,36 [%]		
Potência			
Ativa Total:	12746,54 [kW]	**Ativa Fund.:**	12745,26 [kW]
Reativa Total:	3658,88 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	3738,87 [kVAr]
Aparente Tot.:	13378,63 [kVA]	**Aparente Fund.:**	13282,35 [kVA]
Distorção	1768,13 [kVAd]		
FP Total:	0,953	**FP Fund.:**	0,960

Figura 46 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência de 0,953 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 6,15% está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.2 2º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica: Situação Atual Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

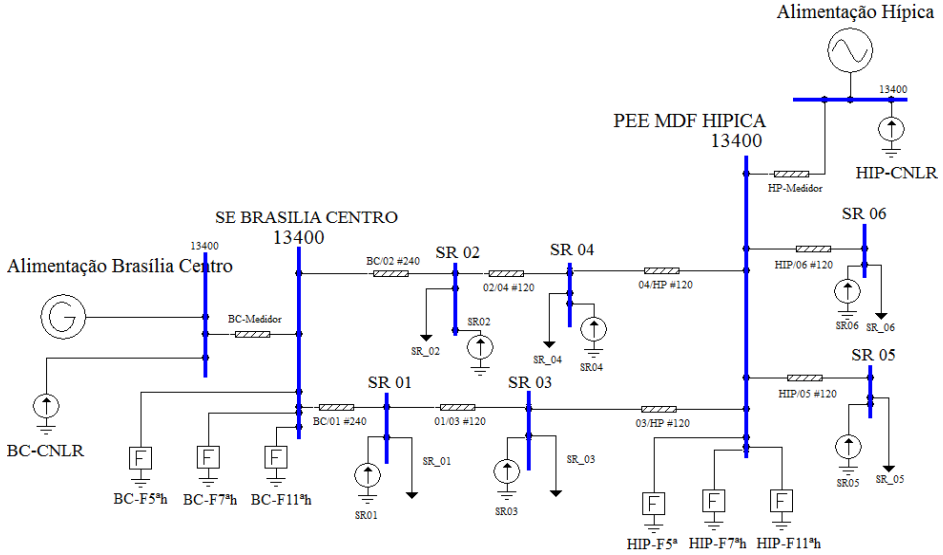


Figura 47 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais;
BC-F5ªh: Brasília Centro – Filtro de Quinta harmônica;
BC-F7ªh: Brasília Centro – Filtro de Sétima harmônica;
BC-F11ªh: Brasília Centro – Filtro de Décima Primeira harmônica;
HP-CNLR: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais;
HP-F5ªh: Hípica – Filtro de Quinta harmônica;
HP-F7ªh: Hípica – Filtro de Sétima harmônica;
HP-F11ªh: Hípica – Filtro de Décima Primeira harmônica;

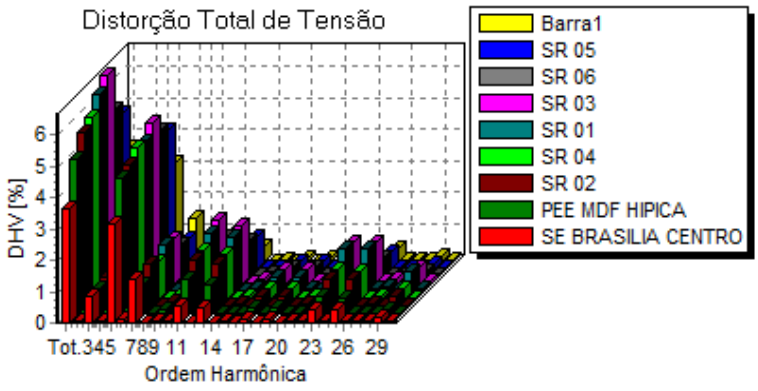
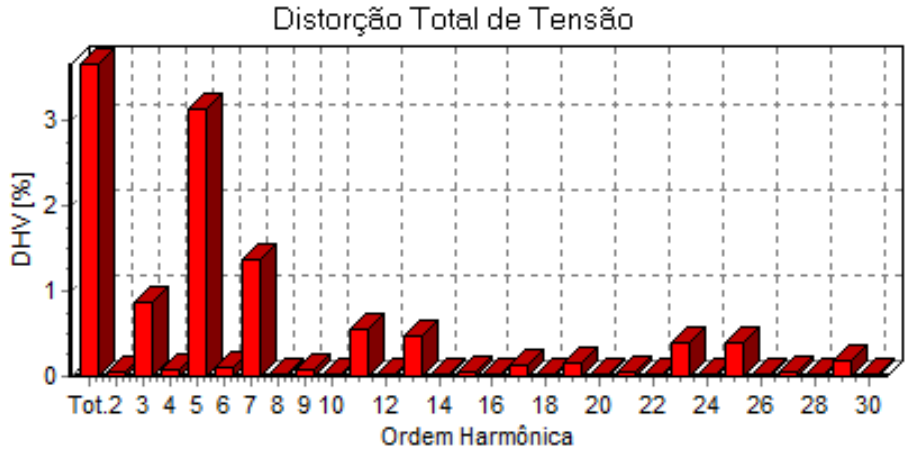


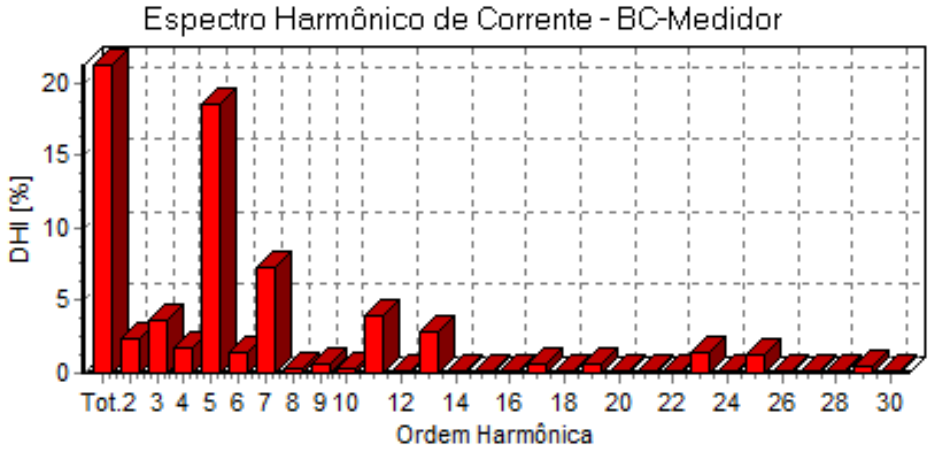
Figura 48 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.2.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 49 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	BC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13408,98 [V]		
DHVtotal:	3,66 [%]		
Corrente			
Eficaz:	234,21 [A]		
DHItotal:	21,25 [%]		
Potência			
Ativa Total:	5304,36 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,06 [kW]
Reativa Total:	407,73 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	437,90 [kVAr]
Aparente Tot.:	5439,48 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5317,13 [kVA]
Distorção	1133,77 [kVAd]		
FP Total:	0,975	**FP Fund.:**	0,997

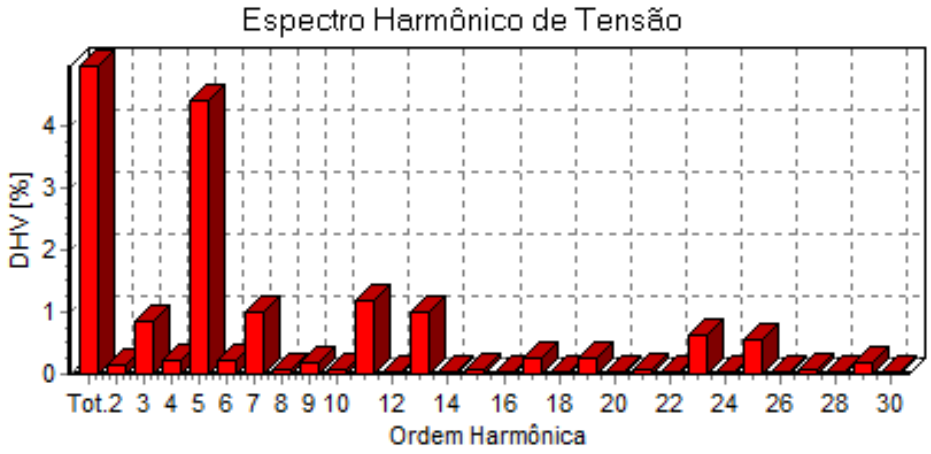
Página 1

Figura 50 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

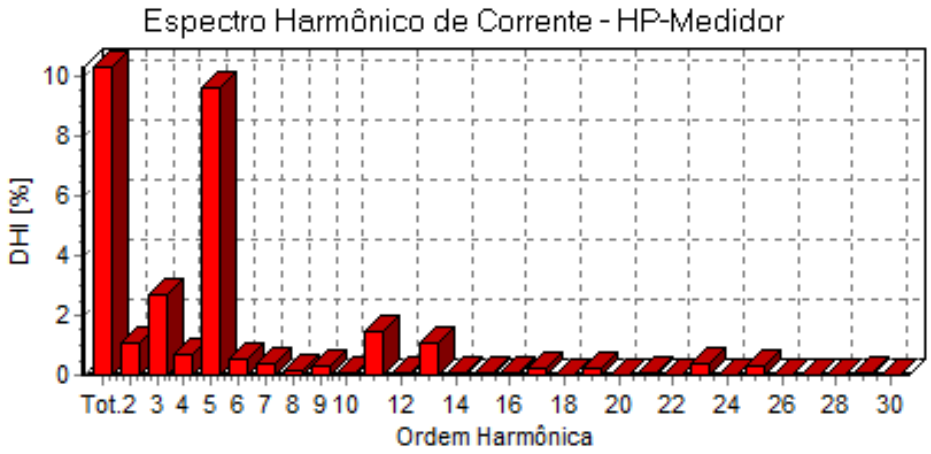
Observa-se que o fator de potência de 0,975 na SE BC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 3,66% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.2.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 51 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13416,43 [V]		
DHVtotal:	4,95 [%]		
Corrente			
Eficaz:	553,34 [A]		
DHItotal:	10,28 [%]		
Potência			
Ativa Total:	12767,05 [kW]	**Ativa Fund.:**	12765,34 [kW]
Reativa Total:	444,83 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	507,12 [kVAr]
Aparente Tot.:	12858,42 [kVA]	**Aparente Fund.:**	12775,41 [kVA]
Distorção	1464,01 [kVAd]		
FP Total:	0,993	**FP Fund.:**	0,999

Figura 52 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência capacitivo de 0,993 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 4,95% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.3 3º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica: Situação Futura Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel. Para este caso, considera-se uma perspectiva de crescimento de carga de 100% durante de 20 anos.

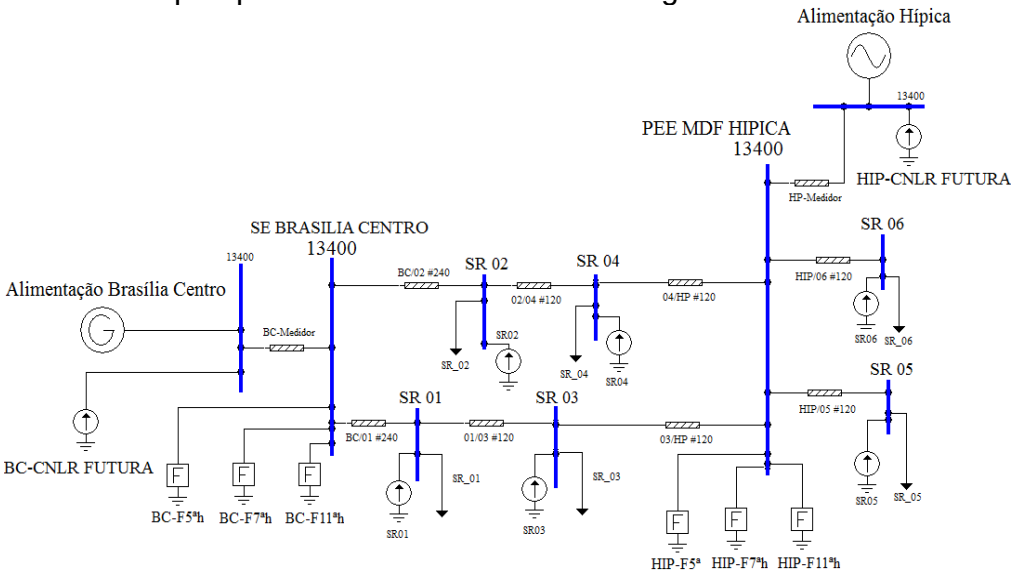


Figura 53 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR FUTURA: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
BC-F5ªh: Brasília Centro – Filtro de Quinta harmônica;
BC-F7ªh: Brasília Centro – Filtro de Sétima harmônica;
BC-F11ªh: Brasília Centro – Filtro de Décima Primeira harmônica;
HP-CNLR FUTURA: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
HP-F5ªh: Hípica – Filtro de Quinta harmônica;
HP-F7ªh: Hípica – Filtro de Sétima harmônica;
HP-F11ªh: Hípica – Filtro de Décima Primeira harmônica;

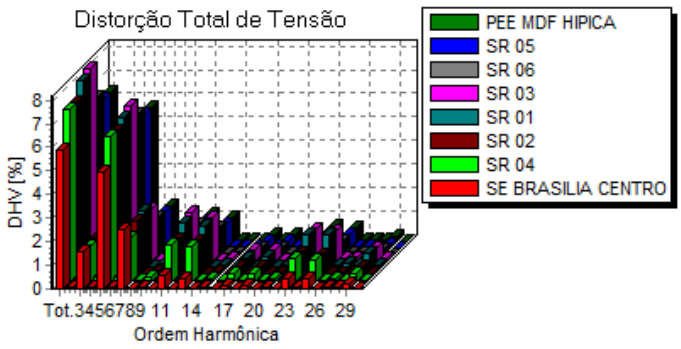
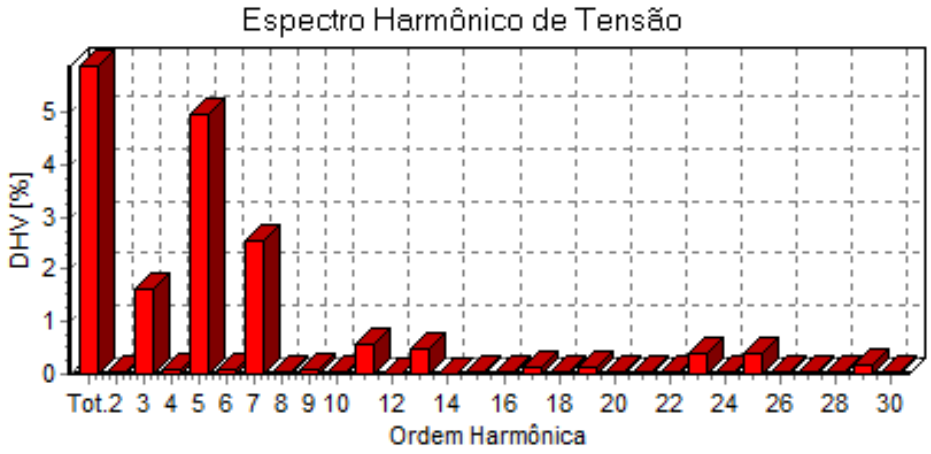


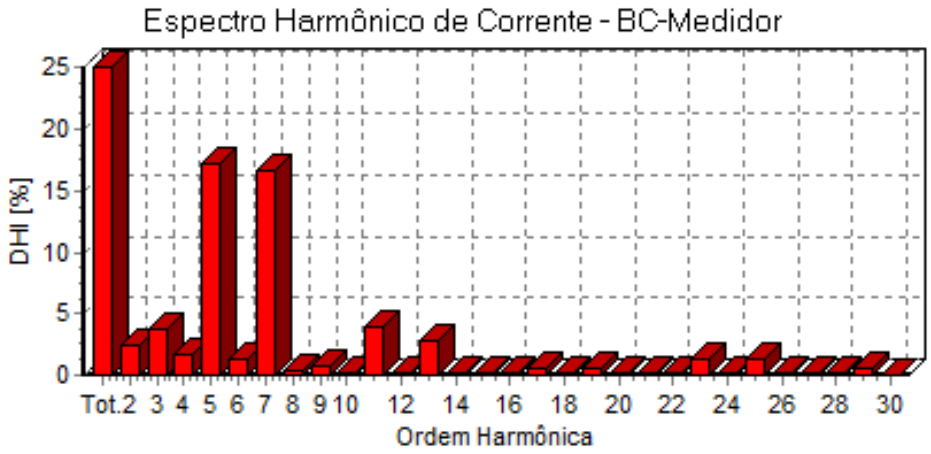
Figura 54 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.3.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 55 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	BC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13423,12 [V]		
DHVtotal:	5,88 [%]		
Corrente			
Eficaz:	236,18 [A]		
DHItotal:	25,07 [%]		
Potência			
Ativa Total:	5318,45 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,06 [kW]
Reativa Total:	410,13 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	437,90 [kVAr]
Aparente Tot.:	5491,19 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5317,13 [kVA]
Distorção	1303,45 [kVAd]		
FP Total:	0,969	**FP Fund.:**	0,997

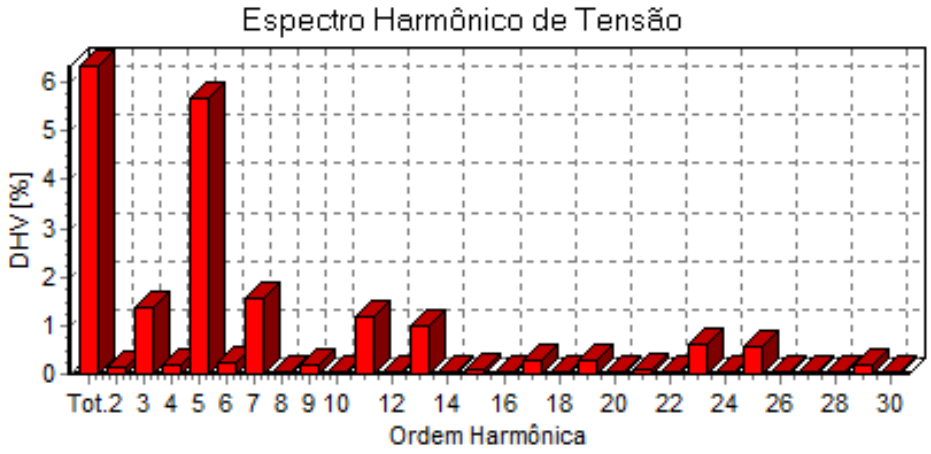
Página 1

Figura 56 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

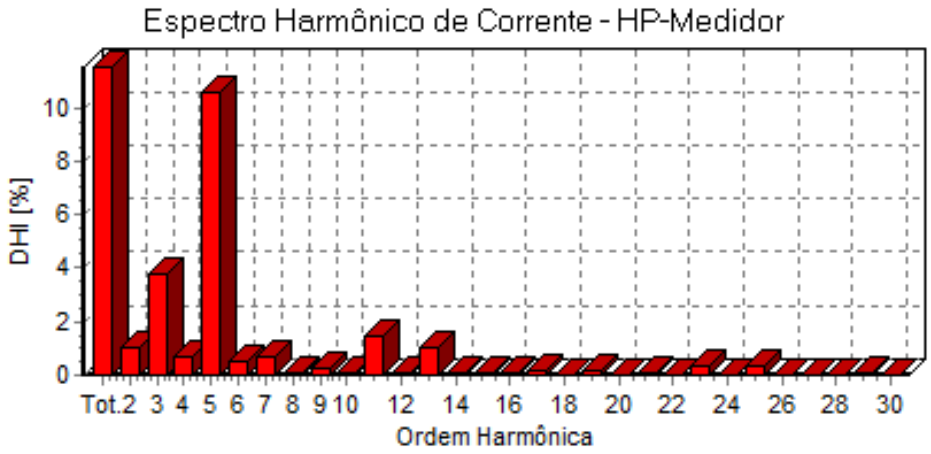
Observa-se que o fator de potência de 0,969 na SE BC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas no SE BC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 5,88% e está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014, mas tal situação não é de responsabilidade do Metrô-DF, pois as cargas não lineares que aumentarão ao longo dos anos são cargas da CEB.

5.2.3.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 57 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª			
Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13426,84 [V]		
DHVtotal:	6,33 [%]		
Corrente			
Eficaz:	554,07 [A]		
DHItotal:	11,51 [%]		
Potência			
Ativa Total:	12771,47 [kW]	**Ativa Fund.:**	12765,34 [kW]
Reativa Total:	419,32 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	507,12 [kVAr]
Aparente Tot.:	12885,51 [kVA]	**Aparente Fund.:**	12775,41 [kVA]
Distorção	1658,35 [kVAd]		
FP Total:	0,991	**FP Fund.:**	0,999

Figura 58 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência capacitivo no valor de 0,991 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residências conectadas ao PEE/HP a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 6,33% e está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014, mas tal situação não é de responsabilidade do Metrô-DF, pois as cargas não lineares que aumentarão ao longo dos anos são cargas da CEB.

5.2.4 4º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica Contingência: Situação Atual Sem Filtros

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

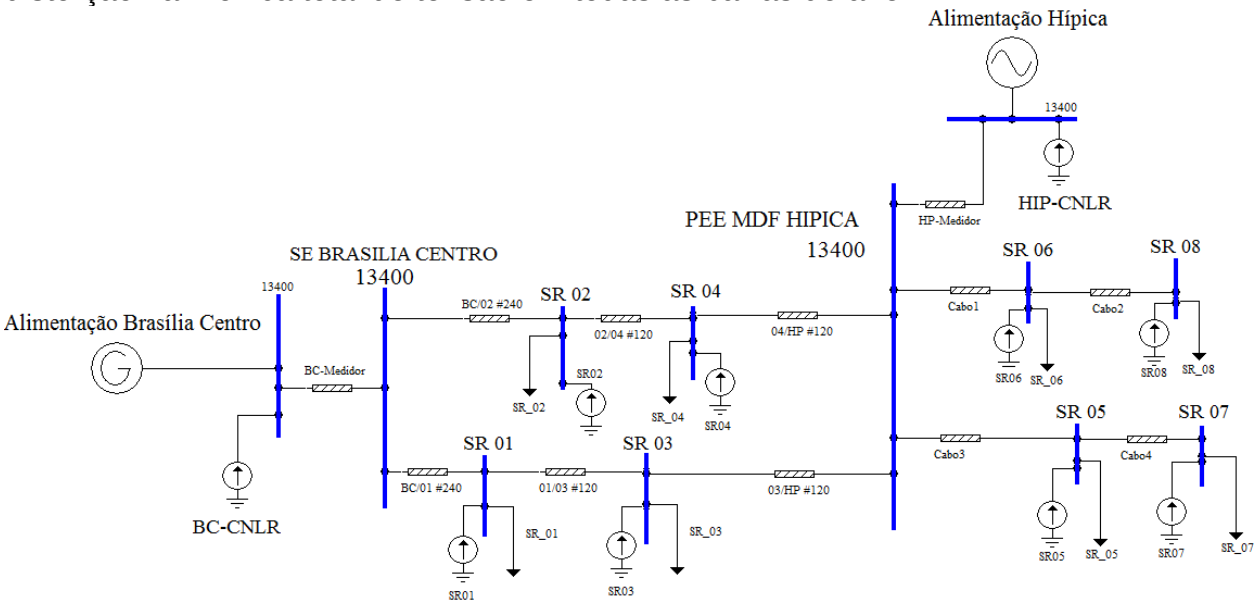


Figura 59 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais;
HP-CNLR: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais;

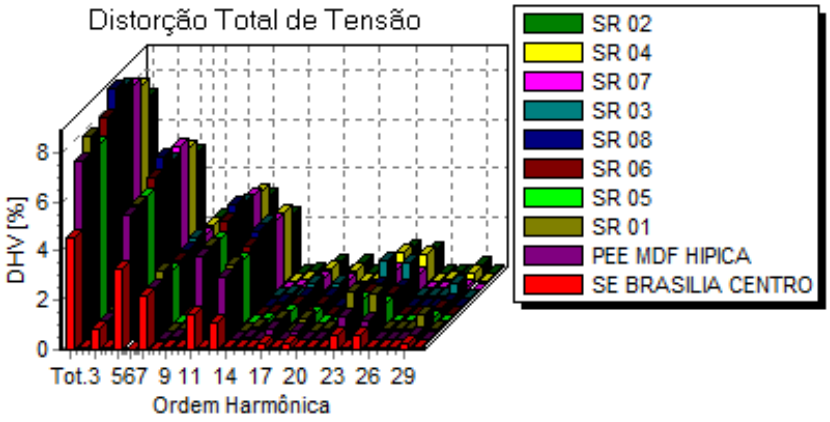
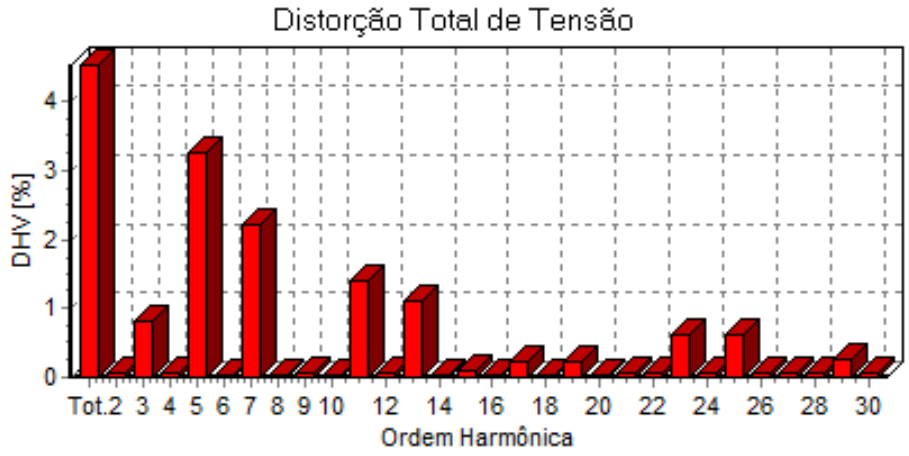


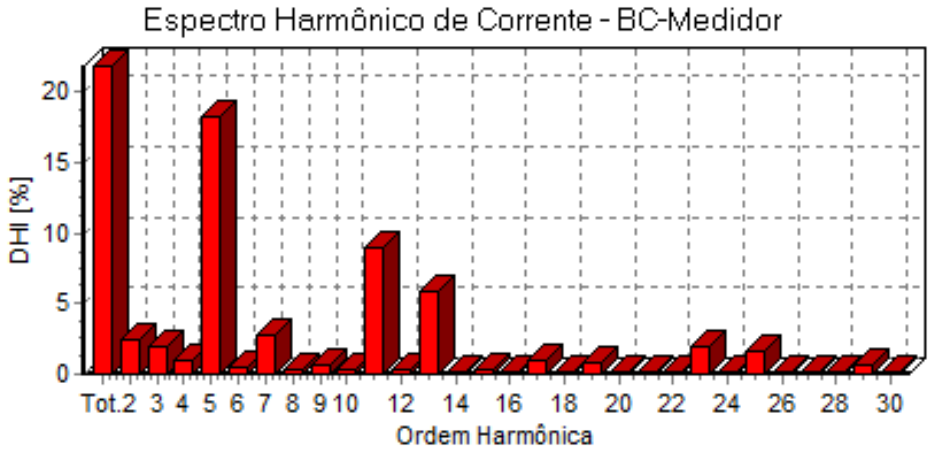
Figura 60 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.4.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 61 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Sem Filtros - Contingência SR07 e SR08			
Nome do Elemento:	BC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13358,94 [V]		
DHVtotal:	4,53 [%]		
Corrente			
Eficaz:	261,38 [A]		
DHItotal:	21,85 [%]		
Potência			
Ativa Total:	5304,04 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,10 [kW]
Reativa Total:	2547,64 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2599,62 [kVAr]
Aparente Tot.:	6047,82 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5902,41 [kVA]
Distorção	1397,43 [kVAd]		
FP Total:	0,877	**FP Fund.:**	0,898

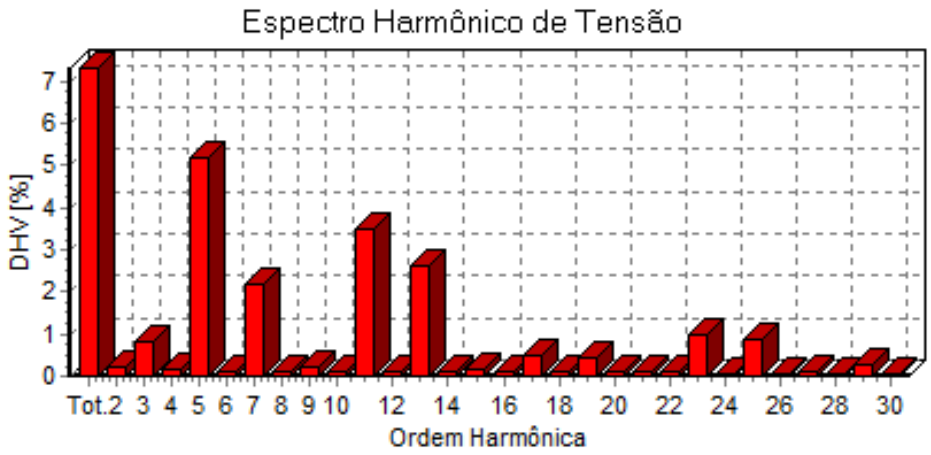
Página 1

Figura 62 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

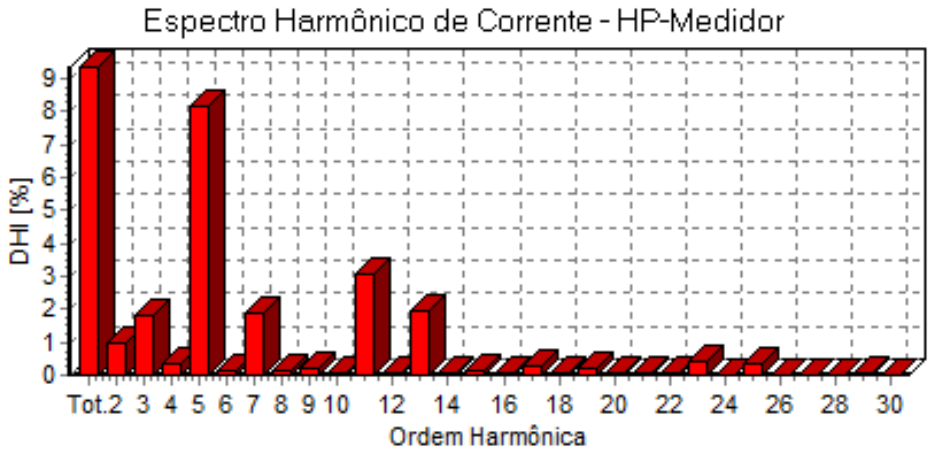
Observa-se que o fator de potência de 0,877 na SE BC está fora dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 4,53% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.4.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 63 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Sem Filtros - Contingência SR07 e SR08			
Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13435,72 [V]		
DHVtotal:	7,31 [%]		
Corrente			
Eficaz:	797,99 [A]		
DHItotal:	9,34 [%]		
Potência			
Ativa Total:	17673,47 [kW]	**Ativa Fund.:**	17671,54 [kW]
Reativa Total:	5151,81 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	5270,57 [kVAr]
Aparente Tot.:	18570,41 [kVA]	**Aparente Fund.:**	18440,78 [kVA]
Distorção	2442,86 [kVAd]		
FP Total:	0,952	**FP Fund.:**	0,958

Figura 64 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência de 0,952 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 7,31% está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.5 5º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica Contingência: Situação Atual Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel.

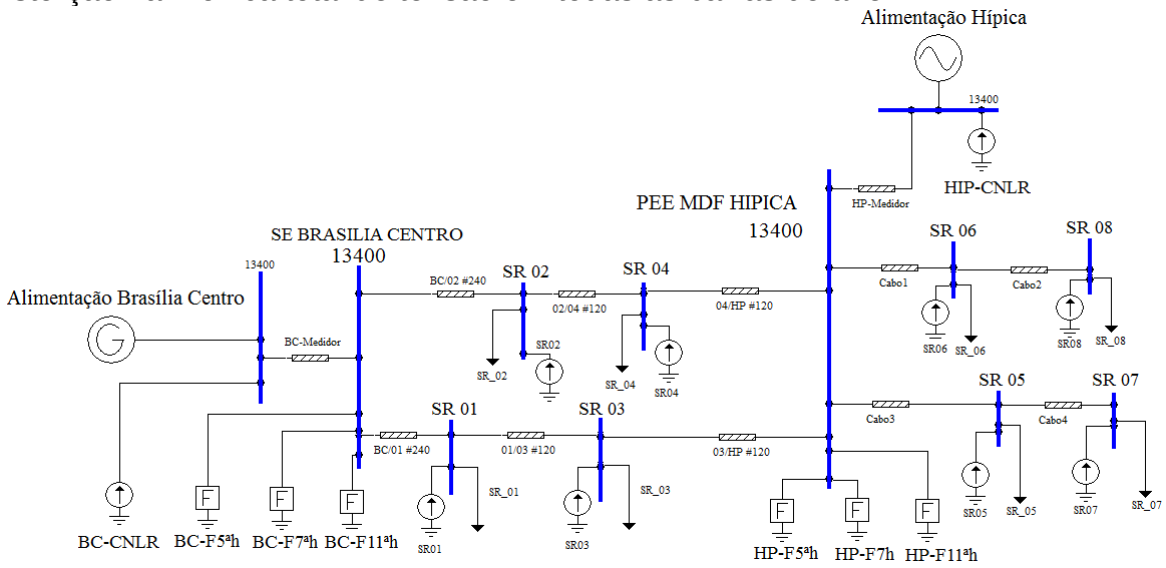


Figura 65 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais;
BC-F5ªh: Brasília Centro – Filtro de Quinta harmônica;
BC-F7ªh: Brasília Centro – Filtro de Sétima harmônica;
BC-F11ªh: Brasília Centro – Filtro de Décima Primeira harmônica;
HP-CNLR: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais;
HP-F5ªh: Hípica – Filtro de Quinta harmônica;
HP-F7ªh: Hípica – Filtro de Sétima harmônica;
HP-F11ªh: Hípica – Filtro de Décima Primeira harmônica;

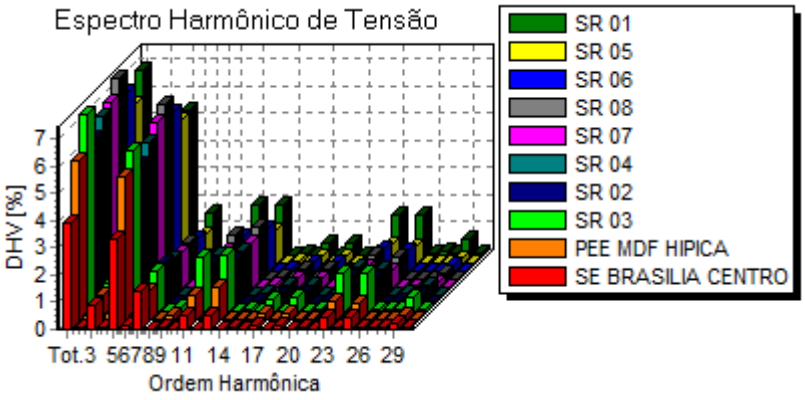
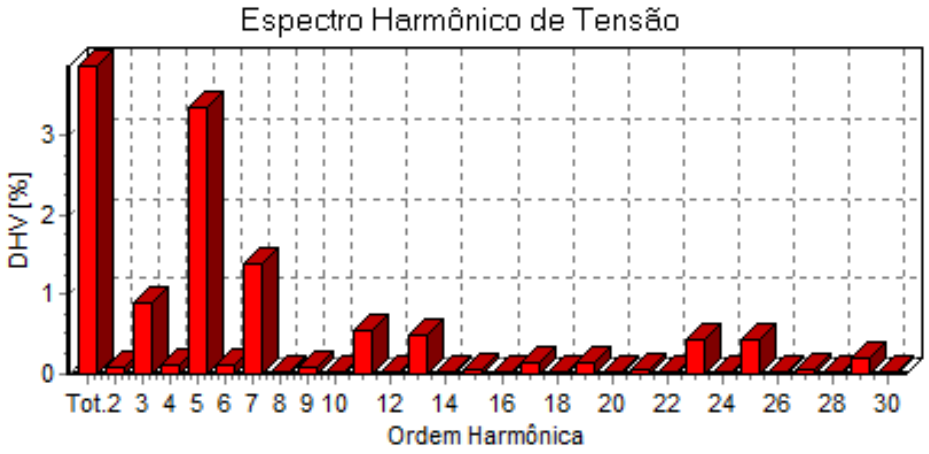


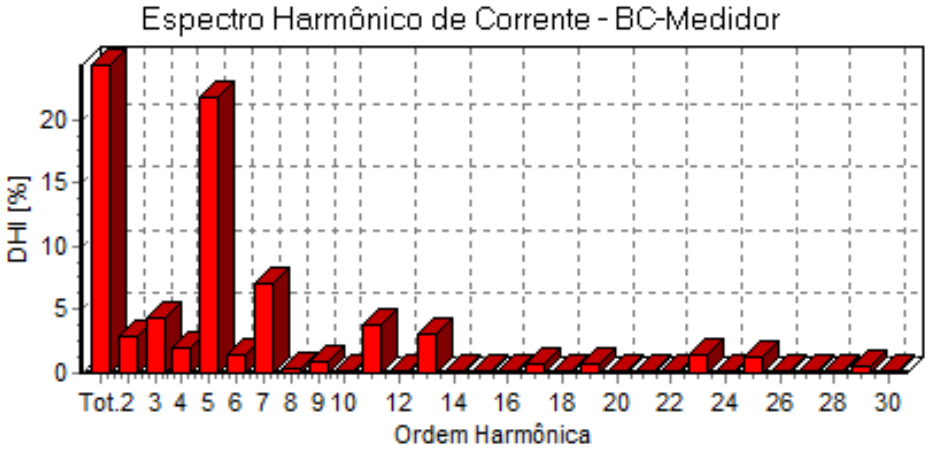
Figura 66 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.5.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 67 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª - Contingência SR07 e SR08

Nome do Elemento: BC-Medidor

Tensão

Eficaz:	13410,03 [V]
DHVtotal:	3,87 [%]

Corrente

Eficaz:	235,78 [A]
DHItotal:	24,33 [%]

Potência

Ativa Total:	5304,96 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,09 [kW]
Reativa Total:	399,08 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	437,91 [kVAr]
Aparente Tot.:	5476,40 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5317,15 [kVA]
Distorção	1299,67 [kVAd]		
FP Total:	0,969	**FP Fund.:**	0,997

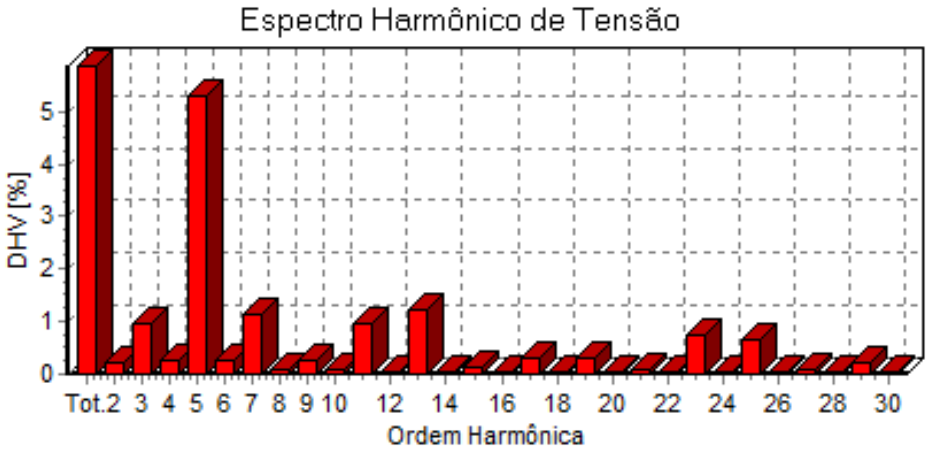
Página 1

Figura 68 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

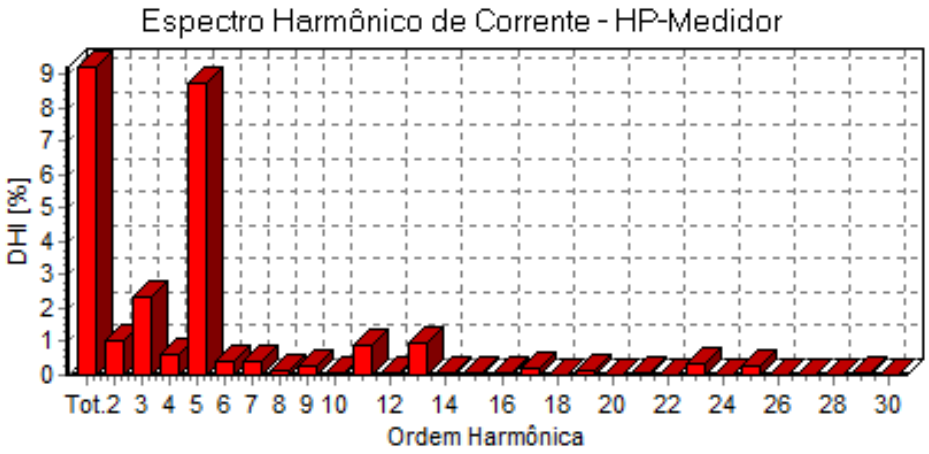
Observa-se que o fator de potência de 0,969 na SE BC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 3,87% está abaixo do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.5.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 69 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Atual Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª - Contingência SR07 e SR08			
Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13423,03 [V]		
DHVtotal:	5,87 [%]		
Corrente			
Eficaz:	770,56 [A]		
DHItotal:	9,22 [%]		
Potência			
Ativa Total:	17693,85 [kW]	**Ativa Fund.:**	17691,56 [kW]
Reativa Total:	1946,09 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2038,79 [kVAr]
Aparente Tot.:	17914,92 [kVA]	**Aparente Fund.:**	17808,65 [kVA]
Distorção	2021,12 [kVAd]		
FP Total:	0,988	**FP Fund.:**	0,993

Figura 70 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência capacitivo de 0,988 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. A distorção harmônica total de tensão (DHTv%) de 5,87% está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014.

5.2.6 6º Caso – Anel Brasília Centro/Hípica Contingência: Situação Futura Com Filtros de 5ª, 7ª e 11ª ordem

As figuras abaixo apresentam o unifilar considerando as injeções de corrente harmônicas do Metrô-DF e residências alimentadas pela mesma barra das SEs e a distorção harmônica total de tensão em todas as barras do anel. Para este caso, considera-se uma perspectiva de crescimento de carga de 100% durante de 20 anos.

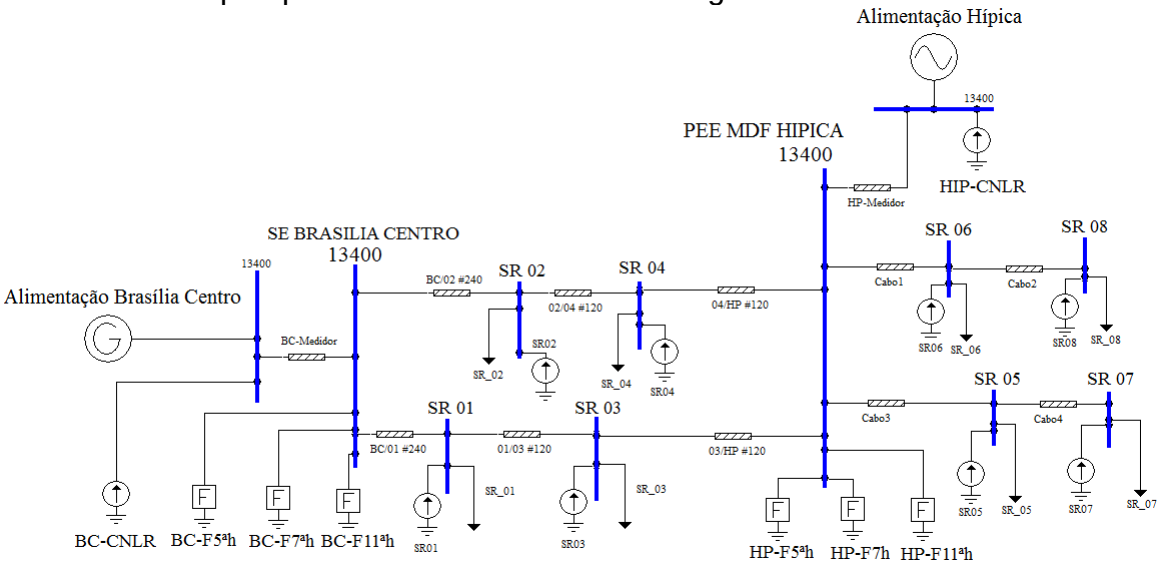


Figura 71 – Diagrama unifilar com as injeções de correntes harmônicas com filtros.

Onde:
BC-CNLR FUTURA: Brasília Centro – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
BC-F5ªh: Brasília Centro – Filtro de Quinta harmônica;
BC-F7ªh: Brasília Centro – Filtro de Sétima harmônica;
BC-F11ªh: Brasília Centro – Filtro de Décima Primeira harmônica;
HP-CNLR FUTURA: Hípica – Cargas Não Lineares Residenciais Futuras;
HP-F5ªh: Hípica – Filtro de Quinta harmônica;
HP-F7ªh: Hípica – Filtro de Sétima harmônica;
HP-F11ªh: Hípica – Filtro de Décima Primeira harmônica;

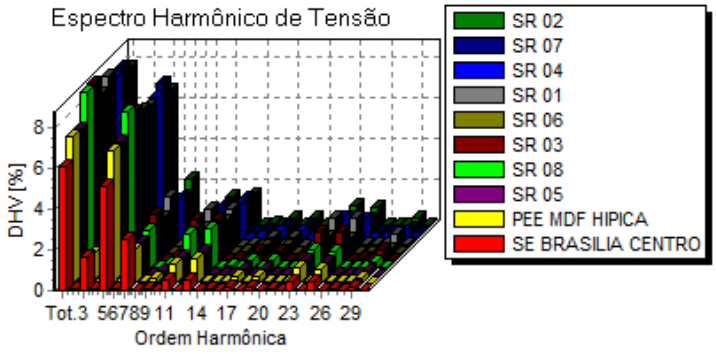
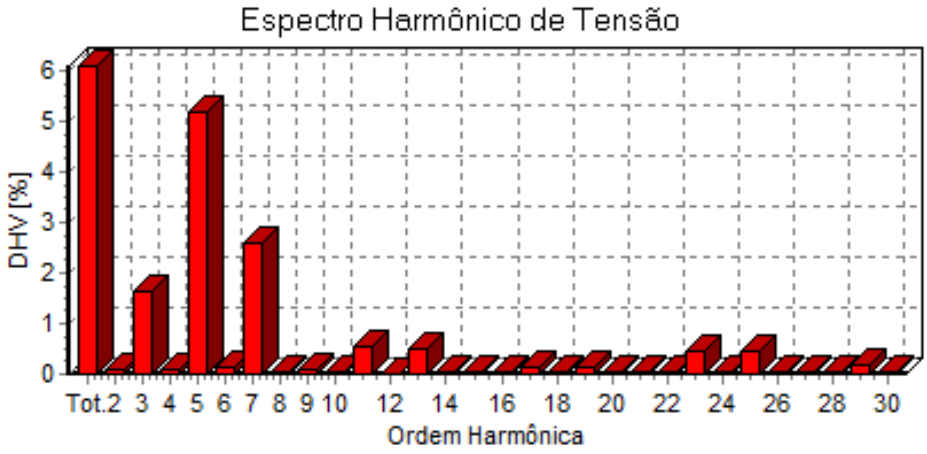


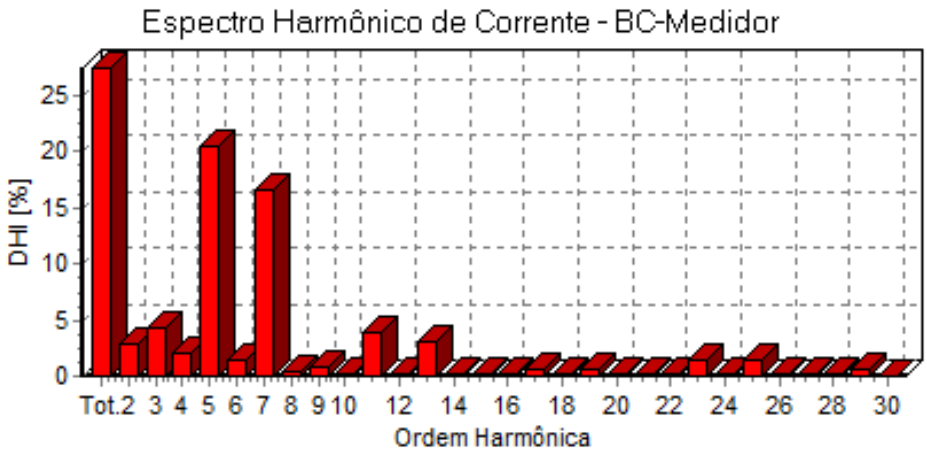
Figura 72 – Espectro Harmônico e Distorção Total de Tensão em todas as barras.

5.2.6.1 Resultados na SE Brasília Centro

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente na SE BC e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 73 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª - Contingência SR07 e SR08			
Nome do Elemento:	BC-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13424,67 [V]		
DHVtotal:	6,07 [%]		
Corrente			
Eficaz:	237,55 [A]		
DHItotal:	27,43 [%]		
Potência			
Ativa Total:	5320,22 [kW]	**Ativa Fund.:**	5299,06 [kW]
Reativa Total:	398,64 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	437,90 [kVAr]
Aparente Tot.:	5523,62 [kVA]	**Aparente Fund.:**	5317,13 [kVA]
Distorção	1430,63 [kVAd]		
FP Total:	0,963	**FP Fund.:**	0,997

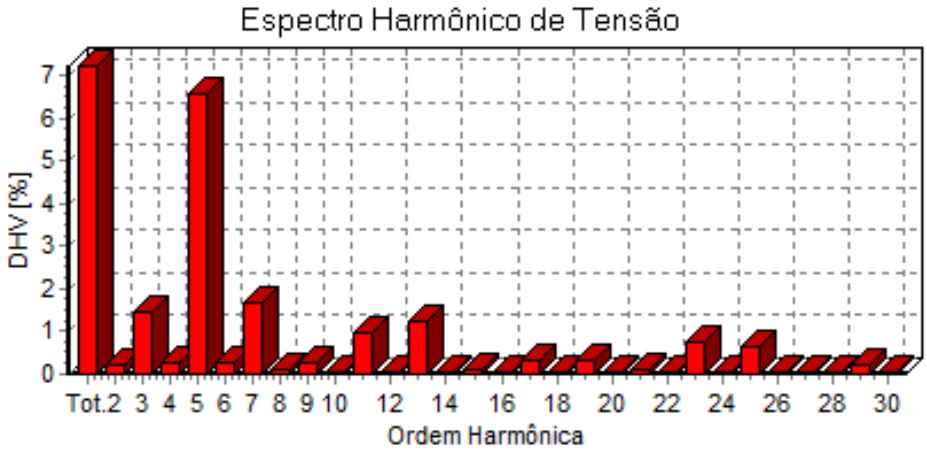
Página 1

Figura 74 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

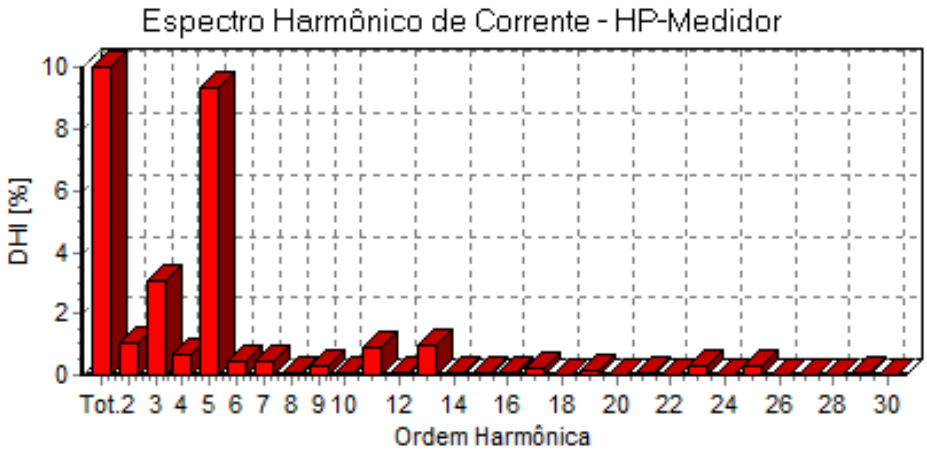
Observa-se que o fator de potência de 0,963 na SE BC está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residenciais conectadas no SE BC a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 6,07% e está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014, mas tal situação não é de responsabilidade do Metrô-DF, pois as cargas não lineares que aumentarão ao longo dos anos são cargas da CEB.

5.2.6.2 Resultados no PEE/HIP

As figuras abaixo apresentam o Espectro Harmônico de Tensão e Corrente no PEE/HIP e os valores de Tensão, Corrente e Potência respectivamente.



(a)



(b)

Figura 75 – Espectro Harmônico e Distorção Total: (a) Tensão; (b) Corrente.

Existente BC_HIP - Futuro Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª - Contingência SR07 e SR08			
Nome do Elemento:	HP-Medidor		
Tensão			
Eficaz:	13434,84 [V]		
DHVtotal:	7,22 [%]		
Corrente			
Eficaz:	771,15 [A]		
DHItotal:	10,03 [%]		
Potência			
Ativa Total:	17699,43 [kW]	**Ativa Fund.:**	17691,55 [kW]
Reativa Total:	1916,16 [kVAr]	**Reativa Fund.:**	2038,79 [kVAr]
Aparente Tot.:	17944,46 [kVA]	**Aparente Fund.:**	17808,64 [kVA]
Distorção	2249,95 [kVAd]		
FP Total:	0,986	**FP Fund.:**	0,993

Figura 76 – Valores de Tensão, Corrente e Potência.

Observa-se que o fator de potência capacitivo no valor de 0,986 no PEE/HIP está dentro dos limites recomendados pelo PRODIST. Em virtude do crescimento das cargas residências conectadas ao PEE/HP a distorção harmônica total de tensão (DHTv%) atinge 7,22% e está acima do limite de 5%, conforme IEEE519/2014, mas tal situação não é de responsabilidade do Metrô-DF, pois as cargas não lineares que aumentarão ao longo dos anos são cargas da CEB.

6 ESPECIFICAÇÃO DOS FILTROS

O dimensionamento dos filtros segue alguns critérios primordiais baseados nas teorias de circuitos elétricos e exigências normativas existentes para manutenção do sistema elétrico de potência, tais como:

- ✓ Atendimento ao Fator de Potência de Referência (0,92ind < FP < 0,92cap) conforme legislação ANEEL;
- ✓ Limites de DHTv(%) (utilizamos como referência a norma IEEE 519/1992 DHTv < 5,0%);
- ✓ Suportabilidade térmica e dielétrica dos capacitores e reatores frente aos componentes harmônicos presentes;
- ✓ Crescimento das cargas geradoras de harmônicas do lado da CEB.
- ✓ Padronização dos equipamentos para maior facilidade de operação e manutenção;

A adoção de um equipamento com potência reativa igual a potência reativa demandada pela SE/PEE, implicaria em correção do fator de potência para valores unitários em condições de carga plena, o que poderia levar o sistema a operar de forma capacitiva quando o sistema estivesse com carregamento baixo. Assim, faz-se necessário conciliar a potência reativa necessária para se corrigir o fator de potência para valores superiores a 0,92 com a drenagem segura de até 100% de distorção harmônica total de corrente nos filtros e garantir a surportabilidade térmica e dielétrica dos seus componentes (capacitores + reatores), mantendo a distorção harmônica total de tensão dentro dos limites recomendados.

Portanto, com base em todas as premissas descritas acima, a potência reativa dos filtros de harmônicos atinge 2700 kVAr. Esta quantidade de reativos é suficiente para a correção do FP dentro dos limites impostos pela legislação, diminui as distorções harmônicas de tensão no PEE/SEs, conforme recomenda a IEEE 519/2014, suporta as condições térmicas e dielétricas imposta pelo conteúdo harmônico com drenagem do mesmo limitado a 100% e padronização para maior facilidade de operação e manutenção.

Filtros com valores de potência abaixo da especificação definida não serão eficientes para diminuir a distorção harmônica de tensão nos PEEs abaixo das recomendações da IEEE 519/2014.

6.1 PEE/HIP

A potência reativa especificada pelo estudo de fluxo de cargas é de 4200 kVAr, porém a potência necessária para filtragem é de 2700 kVAr divididos em:

- 900 kVAr para o filtro de 5ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 7ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 11ª harmônica amortecido.

A potência de 2700 kvar é suficiente pois permite a filtragem de um conteúdo harmônico de até 100% em cada freqüência de sintonia.

6.2 SE Ceilândia Sul

A potência reativa especificada pelo estudo de fluxo de cargas é de 4200 kVAr, porém a potência necessária para filtragem é de 2700 kVAr divididos em:

- 900 kVAr para o filtro de 5ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 7ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 11ª harmônica amortecido.

A potência de 2700 kvar é suficiente pois permite a filtragem de um conteúdo harmônico de até 100% em cada freqüência de sintonia.

6.3 SE Águas Claras

A potência reativa especificada pelo estudo de fluxo de cargas é de 6500 kVAr, porém a potência necessária para filtragem é de 2700 kVAr divididos em:

- 900 kVAr para o filtro de 5ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 7ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 11ª harmônica amortecido.

A potência de 2700 kvar é suficiente pois permite a filtragem de um conteúdo harmônico de até 100% em cada freqüência de sintonia.

6.4 SE Brasília Centro

A potência reativa especificada pelo estudo de fluxo de cargas é de 2800 kVAr, porém a potência necessária para filtragem é de 2700 kVAr divididos em:

- 900 kVAr para o filtro de 5ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 7ª harmônica sintonizado;
- 900 kVAr para o filtro de 11ª harmônica amortecido.

A potência de 2700 kvar é suficiente pois permite a filtragem de um conteúdo harmônico de até 100% em cada freqüência de sintonia.

Observação:

a) Os filtros de harmônicos serão controlados por FP e/ou tempo, através de um relé digital que receberá um sinal de TP e TC instalado na barra do Painel de Entrada de Energia PEE/HIP e nas SEs

b) Os filtros deverão ter uma lógica crescente de entrada (5ª, 7ª e 11ª ordens) e decrescente de saída (11ª, 7ª e 5ª ordens) que estarão intertravados para evitar outros modos de operação.

Paralelamente, o estudo avalia as situações referentes às condições de cargas reativas e distorções harmônicas nas SEs CEB que alimentam os setores existentes (SE CS, SE AC e SE BC) e prevê a necessidade de filtragem similar a que estão sendo feitas nos PEEs dos trechos em expansão e no PEE/HIP.

Essa situação irá requerer tratativas especiais com a concessionária, pois por questões de regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em princípio, não há possibilidade de instalações de consumidores nas áreas da concessionária e, por outro lado, há de se considerar que parte significativa das distorções de harmônicas de 5ª e 7ª ordem tem origem no sistema da concessionária e, portanto, a implantação dos filtros nessas subestações requerem responsabilidades compartilhadas tanto do Metrô-DF como da concessionária.

7 CONCLUSÕES

Um resumo dos casos é apresentado nas tabelas abaixo, assim como outras possíveis configurações que vislumbram uma operação mais crítica.

Tabela 13 – Resumo da DHTv e DHTi e FP do Anel Ceilândia Sul/Águas Claras.

Configuração	SEs	Casos	THDv(%)	THDi(%)	FP
Anel Ceilândia Sul/Águas Claras	CS	Atual: Sem Filtro	3,78	14,22	0,92
		Atual: Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª ordem	2,92	14,24	0,97
		Futuro: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	3,21	14,13	0,97
		Atual Contingência: Sem Filtros	3,85	14,65	0,90
		Atual Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	3,07	14,88	0,97
		Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	3,30	14,79	0,97
	AC	Atual: Sem Filtro	5,06	11,88	0,95
		Atual: Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª ordem	4,04	11,54	0,98
		Futuro: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	4,28	11,50	0,98
		Atual Contingência: Sem Filtros	5,83	11,36	0,96
		Atual Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	4,83	11,05	0,98
		Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	5,02	11,01	0,98

Tabela 14 – Resumo da DHTv e DHTi e FP do Anel Brasília Centro/Hípica

Configuração	SEs	Casos	THDv(%)	THDi(%)	FP
Anel Brasília Centro/Hípica	BC	Atual: Sem Filtro	4,29	18,78	0,88
		Atual: Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª ordem	3,66	21,25	0,98
		Futuro: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	5,88	25,07	0,97
		Atual Contingência: Sem Filtros	4,53	21,85	0,88
		Atual Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	3,87	24,33	0,97
		Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	6,07	27,43	0,96
		* Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem e Filtro 5ª (2000kVAr) da CEB	3,64	21,25	0,97
	HP	Atual: Sem Filtro	6,15	10,36	0,95
		Atual: Com Filtro 5ª, 7ª e 11ª ordem	4,95	10,28	0,99
		Futuro: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	6,33	11,51	0,99
		Atual Contingência: Sem Filtros	7,31	9,34	0,95
		Atual Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	5,87	9,22	0,99
		Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem	7,22	10,03	0,99
		* Futuro Contingência: Com Filtros 5ª, 7ª e 11ª ordem e Filtro 5ª (2000kVAr) da CEB	4,56	13,06	0,98

*** Esta solução é de responsabilidade da CEB, visto que mesma é responsável pelas cargas residências, comerciais e industriais conectadas na barra. Neste caso utilizou-se outro filtro de 2000kVAr sintonizado na 5ª harmônica conectado na barra da SE BC e SE HIP para o futuro crescimento das cargas em 20 anos.**

O Filtro de Harmônica tem como função filtrar as harmônicas provenientes do circuito de tração do Metrô-DF para a rede de corrente alternada da CEB, a fim de evitar problemas decorrentes dessas harmônicas na rede, bem como evitar ressonâncias indesejadas.

Em função de estudos preliminares o projeto dos Filtros de Harmônicas para a modernização do Metrô-DF no trecho Anel Ceilândia Sul/Águas Claras e Anel Brasília Centro/Hípica devem filtrar três harmônicas diferentes, 5ª, 7ª e 11ª harmônicas, sendo denominado filtro de tripla sintonia que visam amortizar também os efeitos das harmônicas geradas pelas cargas não lineares existentes na CEB.

Apesar da presença dos Retificadores de 12 pulsos, os resultados obtidos em campo em várias destas aplicações têm mostrado que a resultante harmônica de 13° ordem, quando da instalação filtros de 11° ordem de forma amortecida, não ofende os limites prescritos na IEEE 519 (norma mais rígida referente ao controle das interferências harmônicas). Contudo, essa solução deverá ser confirmada pelo fornecedor dos equipamentos de filtragem harmônica considerando a avaliação/medição de toda rede de alimentação das SE/PEEs do Metrô-DF em 13,8 kV, as impedâncias dos cabos da rede e as respectivas cargas aplicadas através da realização de novas simulações computacionais.

Cada um dos filtros de harmônicos acima será composto por um banco de capacitores em série com reatores sintonizados na frequência desejada. Apenas o filtro de harmônicos de 11ª ordem é que será amortecido com um resistor instalado em paralelo com o reator.

A operação dos sistemas sem um equipamento de filtragem de harmônicos pode comprometer o funcionamento do Metrô-DF, em virtude dos altos índices de distorção no PEE HIP que estão acima dos limites recomendadas pela norma IEEE 519/2014 (DHTv < 5%).

Recomenda-se a aplicação de filtros sintonizados na 5ª, 7ª e 11ª ordem, que reduz os níveis de distorção harmônica total de tensão dentro dos limites recomendados pela norma em 13,8 kV (IEEE 519/2014).

Os filtros de harmônicos serão controlados por FP e/ou tempo, através de relé digital que receberá um sinal de TP e TC instalado na barra de alimentação das SEs/PEE.

Os filtros de harmônicos deverão possuir dispositivos (com TCs e multimedidores por fase) que limitem a distorção harmônica total de corrente (DHTi%) por fase devido às fortes influências das harmônicas advindas do sistema elétrico da CEB e que tendem a crescer com o aumento da demanda ao longo dos anos.

Os filtros deverão ter uma lógica crescente de entrada (5ª, 7ª e 11ª ordens) e decrescente de saída (11ª, 7ª e 5ª ordens) que estarão intertravados para evitar outros modos de operação. Os filtros de maior ordem não podem de forma alguma operar sem os filtros de menor ordem, ou seja, o filtro de 11ª ordem não pode operar sem os filtros de 5ª e 7ª ordem e o filtro de 7ª ordem não pode operar sem o filtro de 5ª ordem, para evitar problemas sérios de anti-ressonâncias.

Observa-se que o crescimento das cargas residenciais, comerciais e industriais durante os anos aumenta o valor da distorção harmônica total de tensão nas barras assim como a distorção total de corrente no transformador. Entende-se que o

aumento das distorções supracitadas é de responsabilidade da concessionária (CEB) e assim a mesma deve realizar operações para filtragem do correspondente conteúdo harmônico de tais cargas.

Com o crescimento das cargas os filtros passarão a drenar mais correntes harmônicas até atingir seu limite de suportabilidade podendo danificar o equipamento. Assim, os filtros de harmônicos deverão possuir dispositivos (com TCs e multimedidores por fase) que limitem a distorção harmônica total de corrente (DHTi%).

Para o anel Brasília Centro/Hípica, a pior condição de funcionamento será em contingência, ou seja, quando o anel alimentar também a SR07 e SR08, tanto para o caso atual quanto para o futuro com filtros. Apenas nestes casos, a DHTv atinge 5,87% e 7,22% na SE Hípica e 3,87% e 6,07% na SE Brasília Centro. Assim, recomenda-se que a operação de contingência do Anel Brasília Centro/Hípica seja realizada por tempo determinado para evitar danos de isolação, térmico e de má operação no sistema elétrico do Metrô-DF.

Para o futuro, recomenda-se a realização de uma nova medição e estudo de fluxo harmônico para analisar o aumento do conteúdo harmônico, em virtude do crescimento das cargas alimentadas pela CEB, para dimensionamento de uma solução que atenda aos requisitos da qualidade de energia. Caso as cargas do Metrô-DF venham a aumentar com os anos, a mesma também deve seguir as recomendações acima e se responsabilizar pelo conteúdo harmônico produzido.

Recomenda-se tratativas com a CEB para substituição dos filtros existentes sintonizados na 11ª ordem pela solução proposta neste trabalho, visto que os mesmo devem estar com a vida útil avançada, já apresentaram problemas de amplificação harmônica devido ao efeito da anti-ressonância gerada por estes filtros em frequências harmônicas de menor ordem e a redução do fator de potência no ponto de aplicação (efeito contrário ao esperado) quando este equipamentos eram energizados.

Do ponto de vista da qualidade da energia elétrica, sobretudo harmônicos, os resultados evidenciam que a maior parte da distorção harmônica de tensão nas barras de alimentação é de responsabilidade da CEB, em virtude da presença de carga residenciais, comerciais e industriais e o crescimento das mesmas. Até então, não houve aumento da carga do Metrô-DF que produziria o aumento de distorção harmônica de tensão relatada.

Em vista do exposto acima, apresenta-se uma ideia de solução técnica com objetivo de separar as responsabilidades quanto à geração de conteúdo harmônico no sistema elétrico: Alimentação independente para o Metrô-DF em 138kV. Essa condição resultaria nas seguintes vantagens:

- ✓ Redução dos valores de correntes harmônicas a serem drenadas pelos filtros de harmônicos, visto a separação dos barramentos da CEB e do Metrô-DF, com redução significativa dos valores nominais dos filtros de harmônicos;

- ✓ Redução de custos de implantação e manutenção dos filtros harmônicos;
- ✓ Os valores atuais e futuros de distorção harmônica de total de tensão seriam praticamente os mesmos, caso a carga do Metrô-DF não seja alterada, mesmo havendo alteração do quantitativo de carga da CEB;
- ✓ Redução da fatura mensal de energia, pois no 138kV o valor é significativamente inferior aos custos tarifários praticados no 13,8kV;
- ✓ Aumento da estabilidade do sistema elétrico do Metrô-DF e redução da oscilação da energia na ocorrência de faltas em alimentadores da CEB em 13,8kV;
- ✓ Diminuição da interrupção do funcionamento do Metrô-DF em virtude de possíveis defeitos ocorridos no sistema elétrico da CEB, aumentando a qualidade do serviço prestado ao usuário;

ANEXO I - TEORIA DE CÁLCULO DE FILTROS DE HARMÔNICOS PASSIVOS

1 INTRODUÇÃO

Diante do crescente emprego das cargas elétricas especiais (também denominadas de fontes harmônicas), e dos efeitos prejudiciais dos harmônicos para as instalações elétricas em geral, impõe-se a necessidade de adotar medidas de controle e redução dos níveis de “poluição” harmônica nessas instalações. Dentre as medidas possíveis, uma das mais eficazes e importantes consiste da instalação de filtros harmônicos em derivação nos circuitos de potência.

O objetivo fundamental de um filtro harmônico consiste em reduzir a amplitude de uma ou mais correntes ou tensões harmônicas, em uma determinada parte do sistema. Todavia, já que as instalações que apresentam problemas de perturbações harmônicas normalmente também necessitam de compensação reativa, os filtros, conectados em paralelo com o sistema e próximos às fontes harmônicas, poderão também servir à tarefa adicional de prover potência reativa a frequência fundamental. Isto significa que dois aspectos se entrelaçam na determinação de filtros harmônicos: o desempenho de filtragem e a compensação reativa.

Quanto à filtragem, as correntes oriundas das cargas especiais fluirão para o interior dos filtros e também penetrarão o sistema CA, em magnitudes que dependerão da relação entre suas respectivas admitâncias, para as frequências consideradas. O padrão desejado da admitância do circuito de filtragem pode ser obtido através da apropriada combinação de elementos capacitivos, indutivos e resistivos, formando, por exemplo, braços de filtros sintonizados ou amortecidos, em combinações variadas.

2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS

Filtros são circuitos capazes de separar sinais elétricos (correntes e tensões), alterando as características de amplitude e fase desses sinais. Este processo de separação dos sinais elétricos ou, simplesmente, filtragem, ocorre graças às diversas características das curvas de impedância dos diferentes filtros com relação ao espectro de frequências.

Desse modo, de acordo com o tipo de filtro, a finalidade de filtragem e a característica de frequência do filtro empregado, rejeitam-se sinais de frequências indesejáveis ou, contrariamente, deixam-nos passar.

Os filtros são primordialmente classificados conforme suas características de impedância com a frequência. Assim, estes filtros podem ser agrupados em duas categorias, a saber:

I) Filtros sintonizados.

II) Filtros amortecidos.

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes formados por elementos R, L e C em série ou combinações série-paralela destes elementos de circuito. Nestes filtros, os

elementos capacitivos e indutivos são escolhidos de modo que os circuitos apresentem uma, duas ou três frequências de ressonância.

Os filtros amortecidos são circuitos formados por capacitores, indutores e resistores em diversas combinações. São circuitos capacitivos à frequência fundamental, como os filtros sintonizados, e apresentam baixa impedância predominantemente resistiva, para frequência, denominada frequência de sintonia.

2.1 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências menores que a frequência de sintonia são capacitivos, e para as frequências superiores àquela frequência são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental, estes filtros podem funcionar como compensadores de reativo.

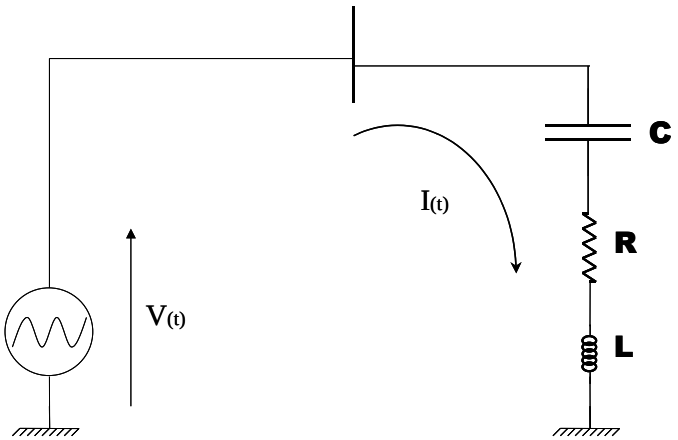


Figura 1- Diagrama de um circuito RLC série (filtro).

Apesar da definição de ressonância série em capítulo anterior, esta será revista do ponto de vista de filtro. Pode-se dizer que a ressonância série é uma condição na qual um circuito contendo pelo menos um indutor e um capacitor apresentará uma impedância de entrada puramente resistiva.

Consequentemente, aplicando-se este conceito ao circuito série da figura 1, cuja impedância complexa é dada pela equação 1, observa-se que, ajustando-se a frequência da fonte, existirá um valor de frequência em que esta impedância será puramente resistiva.

$$Z(w) = R + j.[w.L - \frac{1}{w.C}] \qquad [1]$$

Onde, w é a frequência angular da fonte de alimentação, e R, L e C são os valores dos componentes indicados na figura 6.1.

A condição de ressonância, conforme estabelecida acima, aplicada à equação 1 possibilitará a determinação da frequência que anulará a parte imaginária de Z(w):

$$[w.L - \frac{1}{wC}] = 0 \qquad [2]$$

Assim, explicitando-se a frequência w na equação 2 obtém-se a frequência angular de ressonância do circuito série, que é dada por:

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L.c}} = 2.\pi.f_o = \frac{2.\pi}{T_o} \qquad [3]$$

Onde, w_O é a frequência angular de ressonância do circuito RLC.

Observa-se na equação 3 que w_O é função, apenas, dos componentes L e C do circuito. Portanto, esta frequência (w_O) é uma característica do circuito RLC série. Isto significa que, se a fonte de alimentação (de pulsação w variável) coincidir sua frequência com a frequência w_O própria do circuito, o fará entrar em ressonância série. Procurando então ilustrar, graficamente, as condições de ressonância série, serão tomados o módulo e o ângulo de fase da impedância do circuito da figura 1, conforme indicam as equações 4 e 5:

$$Z(w) = \sqrt{R^2 + [w.L - \frac{1}{w.C}]^2} \qquad [4]$$

$$\phi(w) = tg^{-1}[\frac{w.L - 1/w.C}{R}] \qquad [5]$$

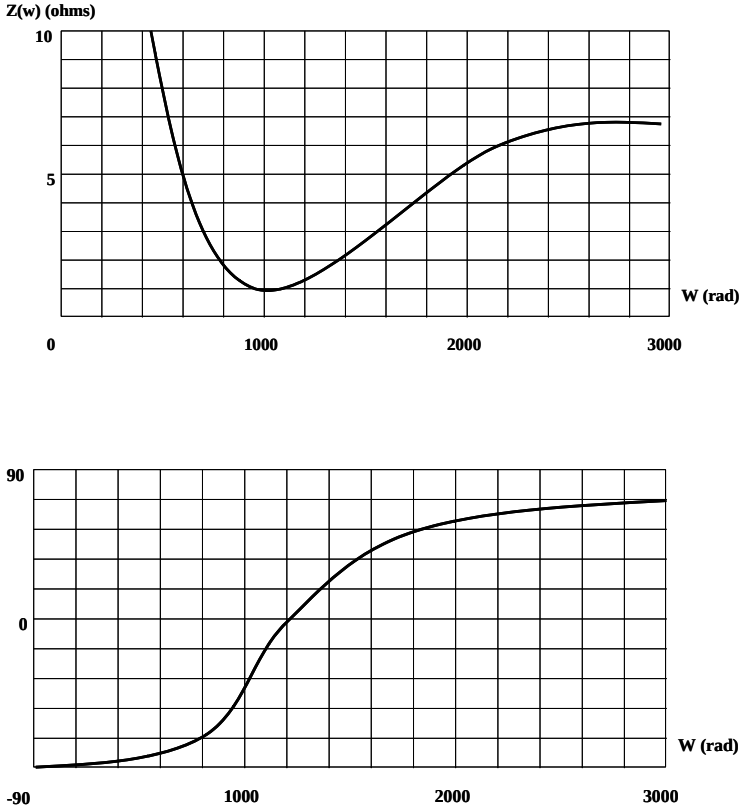
Onde:

Z(w): É o módulo da impedância complexa dada por (1), em função da frequência w;

φ(w): É o ângulo da impedância Z(w), em função de w. Este ângulo difere de φ, apenas, pelo sinal oposto, tomando-se na referência a tensão da fonte dada por 6.

$$V(t) = \sqrt{2}V\cos(wt) \qquad [6]$$

As representações gráficas das equações 4 e 5, respectivamente, estão ilustradas nas figuras 44 e 45, para um dado circuito RLC série de resistência R = 1 Ω, capacitância C= 100 μF e indutância L = 10 mH, cuja frequência angular ressonante (w_O) é 1000 rad/s.



Figuras 2 e 3 - Impedância de um circuito RLC série versus frequência. (3) Módulo. (4) Ângulo.

Pela observação da figura 2 verifica-se que, na frequência de ressonância, a impedância é mínima. Verifica-se também que o módulo de Z(w) aumenta indefinidamente quando w tende para zero ou infinito. Por outro lado, da figura 3, conclui-se que o ângulo de Z(w) anula-se para $w = w_O$. Este fato demonstra que, na ressonância série, o circuito será puramente resistivo. Observa-se também que aumentando a frequência além do w_O, os ângulos da impedância serão positivos e cada vez mais próximos de +90º. Isto implicará que a impedância será predominantemente indutiva nas altas frequências. Inversamente, para frequências baixas e inferiores a frequência de ressonância, o circuito será predominantemente capacitivo.

Uma outra forma de ilustrar a ressonância série consiste em analisar o módulo da corrente elétrica que atravessa os elementos R, L e C. Considerando-se, então, o

circuito da figura 1, sua corrente será dada em função da frequência w, para uma tensão de alimentação de amplitude constante, conforme indica a relação 7.

$$I(w) = \frac{V(w)}{\sqrt{R^2 + (w.L - 1/w.C)^2}} = V(w).Y(w) \qquad [7]$$

Onde:

I(w) e V(w): São, respectivamente, os módulos da corrente e da tensão de alimentação, em função de w;

Y(w): É o módulo da admitância do circuito RLC série, que equivale ao inverso de Z(w).

2.1.1 Comportamento da Energia

O circuito RLC série, conforme ilustrado na figura é composto de elementos que armazenam a energia elétrica (capacitor e indutor) e um elemento que dissipa essa energia sob a forma de calor (resistor).

Por conseguinte, é útil avaliar estas energias quando da condição de ressonância, sendo que elas poderão trazer informações importantes sobre o funcionamento do circuito.

A energia armazenada no capacitor é dada pela equação 8:

$$W_C(t) = \frac{1}{2}.C.v_C^2(t) = \frac{I^2}{w_o^2.C}.\cos^2(w_o.t - 90°) \qquad [8]$$

Já no indutor, a energia armazenada é dada pela equação 9.

$$W_L(t) = \frac{1}{2}.L.i_L^2(t) = L.I^2.\cos^2(w_o.t) \qquad [9]$$

A energia total instantânea armazenada é, portanto, constante e este valor é também o valor máximo, conforme indica a equação 10.

$$W(t) = W_L(t) + W_C(t) = L.I^2 = \frac{1}{w_o^2.C}.I^2 \qquad [10]$$

Por outro lado, a energia perdida no resistor, durante um período, será obtida multiplicando-se a potência média no resistor pelo período correspondente à condição de ressonância:

$$W_{dissipada} = p_{dissipada}.T_o = R.I^2.\frac{2.\pi}{w_o} \qquad [11]$$

Onde, w_O é a frequência angular de ressonância definida pela equação 3.

Considerando-se os dois aspectos de um circuito ressonante, que são: (1) - a máxima energia que é capaz de armazenar e; (2) - as perdas elétricas de energia apresentadas, verifica-se, experimentalmente, que o "afunilamento" ou o pronunciamento das suas curvas de resposta (corrente, impedância, ou admitância versus frequência) será determinado pela relação dessas grandezas. Desta constatação resulta a definição de um parâmetro muito importante, denominado fator de qualidade, o qual será descrito a seguir.

2.1.2 Fator de Qualidade

O fator de qualidade é um parâmetro adimensional definido (tanto para circuitos como para componentes) através da relação entre a máxima energia armazenada e a energia total dissipada por período. Assim, designando-se tal parâmetro pelo símbolo Q, sua definição, conforme a referência é dada por 12:

$$Q = 2.\pi.[\frac{máximaenergiaarmazenadanocircuito}{energiatotaldissipadaporperíodo}] \qquad [12]$$

O fator Q, conforme será demonstrado significa uma medida de grau de pronunciamento das curvas de resposta dos circuitos ressonantes.

Consequentemente, dada à importância do fator de qualidade no estudo de filtros, a partir da definição 12, serão obtidas relações úteis que envolvem a frequência de ressonância e os parâmetros do circuito. Considerando-se, então, o circuito ressonante série da figura 1 e as deduções feitas sobre energia (armazenada e dissipada), pode-se expressar o fator de qualidade, à frequência de ressonância (w_O), em função dos valores dos componentes, conforme mostra a equação 13.

$$Q = \frac{Z_o}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \qquad [13]$$

Onde:

Q = Fator de qualidade

Zo = Impedância natural do sistema

L, C e R = Elementos do filtro.

Entretanto, vale ressaltar que é comum referir-se a fatores de qualidade de reatores, ou de capacitores, como elementos isolados, sendo, portanto outra equação.

O fator de qualidade dos filtros sintonizados também pode ser visto com uma medida do grau de seletividade desses circuitos, quanto às frequências harmônicas. Quanto maior for o fator Q mais seletivo será o filtro, ou seja, ele impedirá cada vez mais a absorção das correntes harmônicas de frequências diferentes daquela de sintonia.

2.1.3 Dessintonia

Variações de frequência ocorrem em qualquer sistema elétrico devido às pequenas modificações de carga e geração. Nos sistemas elétricos reais, variações da ordem de ± 0,15 Hz podem ser observadas.

Os filtros sintonizados, em especial, são sensíveis a estas variações que ocorrem na frequência do sistema elétrico, como também a quaisquer outros fatores que tenham alguma influência sobre os valores dos seus componentes. Assim, se um filtro sintonizado é dimensionado para ter uma impedância mínima para uma dada frequência, três fatores independentes contribuem para dessintonizar o circuito para a harmônica correspondente:

a) variação da frequência do sistema c.a;

b) erro de sintonia inicial, devido ao degrau mínimo de sintonia do reator do filtro, dada à própria característica discreta de seus enrolamentos, e também devido aos erros inerentes à medição;

c) variação da capacitância total, devido à variação da temperatura, ou devido à falha de um ou mais elementos de capacitor, bem como variações entre o valor projetado com o valor obtido após a fabricação (tipicamente entre +2,5% à +7,5 %).

Pode-se também calcular o desvio equivalente de frequência (dessintonia) pela relação 14.

$$\delta = \frac{w - w_o}{w_o} \qquad [14]$$

2.2 FILTROS PASSIVOS AMORTECIDOS

Os filtros amortecidos são circuitos formados por elementos R, L e C, em diferentes combinações, que oferecem baixa impedância sobre uma larga faixa de frequência. Estes circuitos, quando são empregados para filtrar correntes de ordens harmônicas elevadas são denotados por filtros passa - alta.

Na frequência fundamental, a exemplo dos filtros sintonizados, os filtros amortecidos também apresentam impedância predominantemente capacitiva. Já nas frequências superiores, eles são essencialmente resistivos.

Os modelos dos filtros amortecidos são basicamente de quatro tipos: os filtros amortecidos de primeira, segunda e terceira ordens, e o filtro tipo "C". Estes modelos estão ilustrados na figura 4.

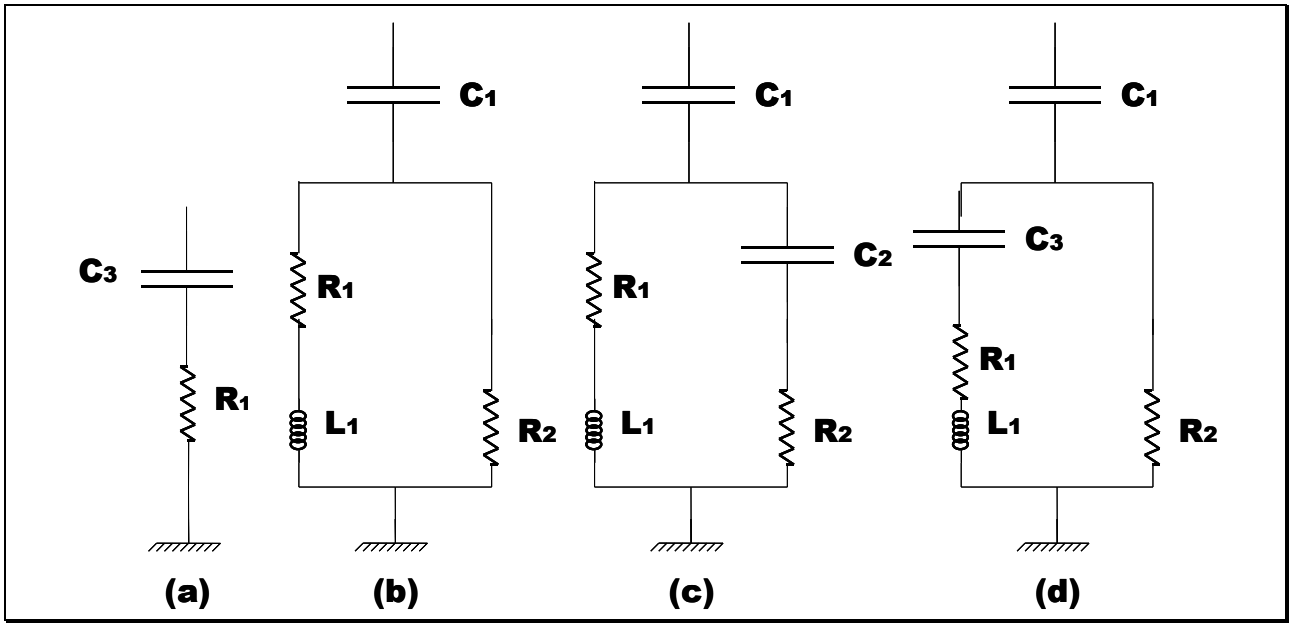


Figura 4 - Filtros amortecidos: (a) 1ª Ordem (b) 2ª Ordem (c) 3ª Ordem (d) Tipo "C".

Dentre os filtros amortecidos, o de 1ª ordem, ilustrado na figura 4a, não é utilizado em aplicações práticas por requerer um grande capacitor e por apresentar excessivas perdas de energia à frequência fundamental. Já os demais filtros amortecidos são largamente utilizados nos sistemas elétricos, e a escolha entre os modelos prende-se aos requisitos de desempenho de filtragem e de perdas de energia.

Por conseguinte, dada à diversidade de modelos de filtros amortecidos e em consideração às peculiaridades de cada modelo, notadamente, no que se referem aos parâmetros característicos, eles serão, então, analisados separadamente.

2.2.1 Filtro Amortecido de 2ª Ordem

Inicialmente, definem-se as grandezas frequência característica, impedância natural e fator de amortecimento, conforme indicam as equações 15, 16 e 17:

- frequência característica:

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \qquad [15]$$

- impedância natural:

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = w_o \cdot L_1 = \frac{I}{w_o \cdot C_1} \qquad [16]$$

- fator de amortecimento:

$$d = \frac{R_2}{Z_o} \qquad [17]$$

A impedância complexa do filtro amortecido de 2ª ordem, para uma frequência w genérica, foi calculada com base nas grandezas características já definidas, desprezando-se a resistência R1. O componente R1, nesta fase do estudo, será desprezado para propiciar a interpretação do significado das grandezas Wo, Zo e d, anteriormente definidas. Tendo em vista também que R1 (a qual geralmente corresponde à resistência própria do reator L1) normalmente possui valor relativamente baixo.

Assim, sendo a equação 18 expressa **Z**f(w) em função de Wo, Z_O e d.

$$Z_f(w) = Z_o \cdot \{ \frac{d + j.(\frac{1}{x}).[d^2 - 1 - (\frac{d}{x})^2]}{1 + (\frac{d}{x})^2} \} \qquad [18]$$

Onde:

$$X = \frac{w_o}{w} \qquad [19]$$

Sendo assim, com base nas grandezas características do filtro amortecido de 2ª ordem, e nas suas expressões de impedância como função da frequência harmônica (equação 18), poder-se-á extrair as propriedades básicas deste tipo de filtro, como também esboçar sua curva característica de impedância versus frequência.

Em primeiro lugar, verifica-se da equação 18 que, para "d" fixo, à medida que a frequência aumenta (ou seja, para valores elevados de "x"), a impedância do filtro tenderá ao valor (Zo x d), que equivale a R2. Este efeito será mais ou menos acentuado dependendo do valor do parâmetro "d".

Já para as ordens harmônicas baixas e, principalmente, à frequência fundamental (ou seja, valores reduzidos de "x"), o filtro de 2ª ordem será predominantemente capacitivo, independentemente do valor de "d".

Assim, de acordo com o que está indicado nas relações 20, 21 e 22, admitindo-se exclusivamente d > 1, ter-se-á comportamento capacitivo, resistivo ou indutivo para este tipo de filtro.

$$w < w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2-1}} \rightarrow Z_f(w) capacitiva \qquad [20]$$

$$w = w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2-1}} \rightarrow Z_f(w) resistiva \qquad [21]$$

$$w > w_o \cdot \sqrt{\frac{d^2}{d^2-1}} \rightarrow Z_f(w) indutiva \qquad [22]$$

No caso contrário, isto é, para valores de "d" menores ou iguais à unidade (d=1), o filtro será sempre capacitivo, independentemente da frequência.

Finalmente, a partir dessas considerações, pode-se representar graficamente a magnitude da impedância do filtro amortecido de 2ª ordem como função da frequência, conforme ilustra a figura 5.

Diante do exposto, conclui-se que o filtro amortecido de 2ª ordem tem sua característica em função da frequência, efetivamente, governada pelos parâmetros d, w_O e Zo. Isto significa que, definindo-se convenientemente os valores desses parâmetros, poder-se-á obter um filtro capacitivo à frequência fundamental, e que, simultaneamente, ofereça impedâncias suficientemente baixas (tendendo ao valor de R2) para as frequências maiores do que uma dada frequência escolhida.

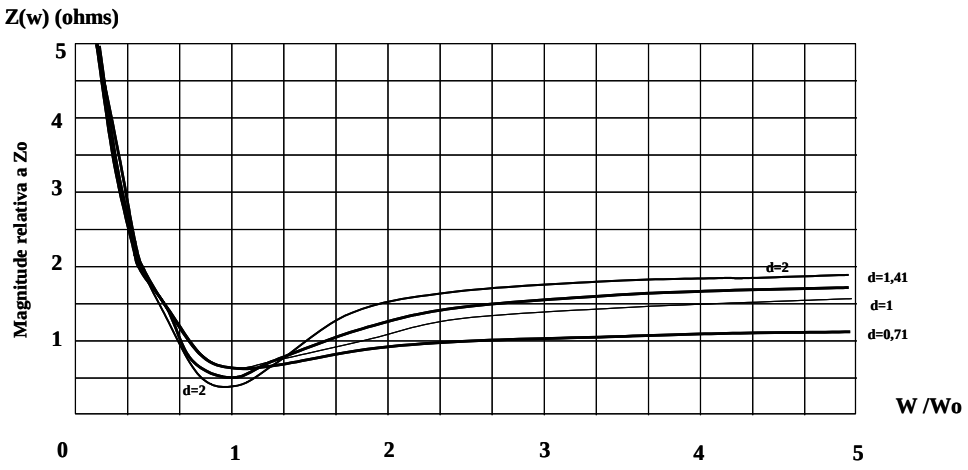


Figura 5 - Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 2ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d".

2.2.2 Filtro Amortecido de 3ª Ordem

Baseando-se no circuito da figura 4.c, e desprezando-se a resistência R1, definem-se as grandezas características do filtro amortecido de 3ª ordem, para o caso particular em que C1 = C2, de maneira similar às equações 15, 16 e 17.

Ressalta-se que, a condição C1 = C2 será destacada porque a consideração de C1= C2 implicaria na existência de duas frequências características distintas, conforme será discutido posteriormente. Além disso, os filtros amortecidos de 3ª ordem usualmente empregados em sistemas de filtragem possuem C1 = C2.

Consequentemente, procedendo-se de modo análogo ao caso do filtro de 2ª ordem, obtém-se a equação 23. Esta equação fornece a impedância do filtro de 3ª ordem em termos de frequência w e dos seus parâmetros característicos.

$$Z_f(w) = Z_o.[\frac{1}{j.x}+(\frac{1}{d+\frac{1}{j.x}}+\frac{1}{j.x})^{-1}] \qquad [23]$$

Onde, "x" é a variável definida anteriormente através da relação [19]

Da equação 23, tomando-se o limite de **Z**F(w) quando "x" tende a valores muito altos, verifica-se que a impedância do filtro convergirá para o valor (Zo x d) que equivale a R2, em conformidade com a equação 17. Contrariamente, para valores muito reduzidos de "x", ou seja, para frequências baixas e inferiores à frequência w_O ter-se-á uma elevada impedância.

Além disso, ainda com base na equação 23 verifica-se que, para a frequência harmônica coincidente com a frequência característica (w_O), o filtro de 3ª ordem apresentará impedância puramente resistiva, independentemente do valor do parâmetro "d". Desse modo, nesta frequência (w = w_O), o valor da impedância do filtro será dado pela equação 24, obtida da substituição de x=1 em 23.

$$Z_f(w = w_o) = \frac{Z_o}{d} \text{ (para qualquer 'd')} \qquad [24]$$

Assim, com base na equação 23, as curvas de magnitude da impedância deste tipo de filtro, em função da frequência, para diversos valores do fator de amortecimento (d), como ilustra a figura 6.

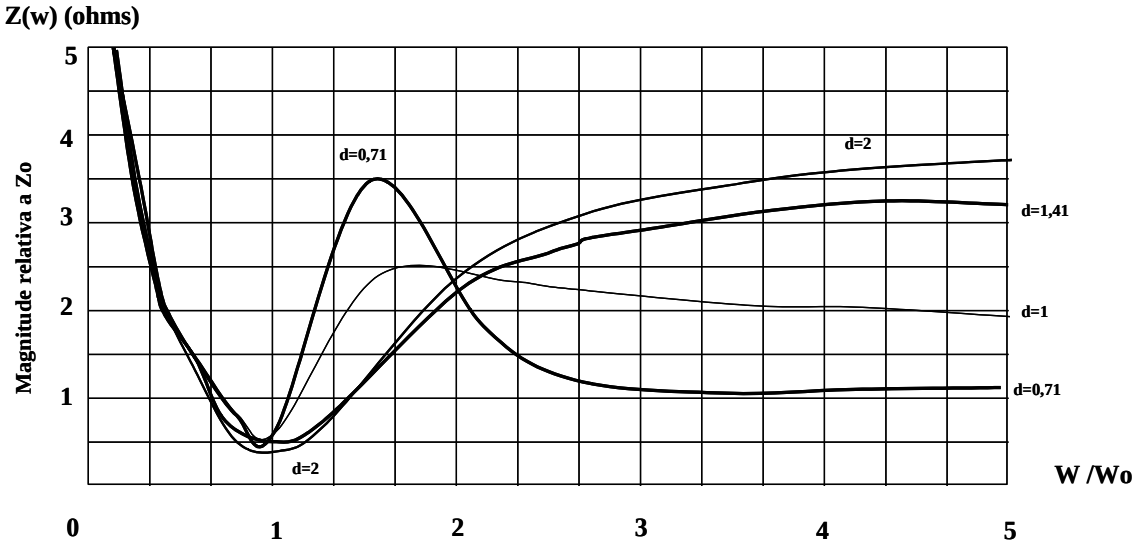


Figura 6 - Magnitudes da impedância do filtro amortecido de 3ª ordem versus frequência, para diferentes valores de "d".

Neste ponto, ressalta-se que o fator de amortecimento (d), definido para os filtros amortecidos, e o fator de qualidade (Q) dos filtros sintonizados guarda uma relação de semelhança pelo menos no que se refere ao significado físico (apesar de serem definidos por expressões inversas).

Nos filtros sintonizados, como foi demonstrado, quanto menor for a resistência (que fica em série com o indutor ou do próprio indutor) mais seletivo será o circuito. Já para os filtros amortecidos, por causa do resistor em paralelo com o indutor (no caso, R2), quanto mais alto for R2 mais "aguda" será a sintonia do circuito. Isto é, em ambos os casos estes parâmetros (d e Q) representam a seletividade dos filtros. No entanto, para o filtro de 3ª ordem, embora a definição adotada para "d" seja a mesma do filtro de 2ª ordem, o efeito do aumento deste fator será o de intensificar a ressonância, e também tornar a anti-ressonância mais acentuada.

Regra geral, o filtro amortecido de 3ª ordem apresenta duas frequências características. Todavia, essas duas frequências serão distintas exclusivamente no caso em que C1 diferente de C2. Neste caso, entre essas duas frequências, a impedância harmônica do filtro será indutiva.

Em qualquer outra parte do espectro a impedância será capacitiva. Por outro lado, à medida que o valor da capacitância C2 se aproxima do valor de C1, o trecho indutivo da impedância tende a desaparecer até que, quando C1 = C2, somente uma frequência característica existirá, tal como foi estudado a partir da equação 23. Nesta situação, a impedância será capacitiva sobre uma larga faixa de frequência, inclusive próximo à frequência característica. Esta situação corresponde ao arranjo mais conveniente, por isso, é o mais enfocado nos estudos.

2.2.3 Filtro Amortecido Tipo "C"

O filtro tipo "C" difere dos outros filtros amortecidos por apresentar o ramo RLC série (constituído pelos elementos C3, L1 e R1, indicados na figura 4 sintonizado à frequência fundamental. Isto implicará que, em condições normais, para esta frequência o ramo RLC sintonizado apresentará uma impedância resistiva de valor R1, que, em vista do alto fator de qualidade do circuito ressonante, é normalmente escolhido de valor baixo. Assim a impedância deste filtro será dada, tão somente, pela reatância do capacitor (C1) combinada com o equivalente paralelo de R1 e R2 (Equação 25). Na prática, esta impedância será determinada pela capacitância C1, conforme indica (26).

$$Z_f(w = w_1) = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - j.\frac{1}{w_1 \cdot C_1} \qquad [25]$$

$$Z_f(w = w_1) = j.\frac{1}{w_1 \cdot C_1} \qquad [26]$$

Esta característica do filtro amortecido tipo "C" implicará que as perdas elétricas resistivas, à frequência fundamental serão menores que aquelas verificadas nos demais filtros amortecidos.

Por outro lado, nas frequências superiores à fundamental, o filtro amortecido tipo "C" terá um comportamento muito parecido com aquele descrito para o filtro de 2ª ordem, tendo em vista a semelhança de seus circuitos. Neste caso, será então possível definir para este tipo de filtro os parâmetros característicos d, Wo e Zo. Do mesmo modo que no caso do filtro de 2ª ordem, à medida que a frequência aumenta, acima da frequência característica, o filtro tipo "C" tenderá a apresentar uma impedância igual a R2.

Em vista do exposto, conclui-se que, todos os filtros amortecidos são predominantemente capacitivos à frequência fundamental, e suas curvas características de impedância variam com a frequência e em função dos parâmetros d, Wo e Zo. Além disso, tais filtros, para as frequências maiores que uma dada frequência de sintonia escolhida (dependente de Wo), oferecerão uma impedância baixa praticamente resistiva, tendendo ao valor R2. Verifica-se também que, nas frequências inferiores àquela escolhida como a de sintonia, a impedância do filtro será relativamente elevada, portanto, absorvendo pouquíssima ou quase nenhuma corrente harmônica.

Todavia, os filtros amortecidos, em geral, apresentam vantagens e desvantagens. A principal vantagem é que esses filtros, durante a operação, não são sensíveis aos desvios de frequência até mesmo para as frequências próximas à de sintonia, exceto o filtro amortecido tipo "C", cujo ramo sintonizado sofrerá a ação da dessintonização. Uma desvantagem dos filtros amortecidos é que, normalmente, tais filtros requerem

maior potência reativa fundamental para alcançar o mesmo desempenho de filtragem que se conseguiria com filtros sintonizados de menor capacidade reativa.

3 PROCEDIMENTO BÁSICO DE CÁLCULO DE FILTROS HARMÔNICOS

Demonstra-se a seguir os passos para o projeto de filtros de harmônicos sintonizados ou amortecidos:

a) Definição da necessidade de reativos a ser fornecida por cada filtro em kVAr, normalmente obtida via simulação do fluxo de carga;

b) Definição tensão nominal rms e da tensão máxima de operação da barra onde o filtro de harmônicos vai ser conectado;

c) Definição da frequência de sintonia a ser adotada para a drenagem da corrente harmônica desejada, obtida através das medições e dos estudos de fluxo de harmônicos.

d) Cálculo da capacitância com base nos itens a, b e c, definidos acima:

$$C = \frac{Q_f}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2} \cdot \frac{h^2 - 1}{h^2} \qquad [27]$$

Onde:

Q_f = Potência do Filtro;

V_n = Tensão Nominal do Sistema;

h = Ordem harmônica do filtro

e) Definição da indutância de forma a atender a ressonância série entre o reator e o banco de capacitores na frequência de sintonia escolhida:

$$Fs = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \quad \rightarrow \quad L = \frac{1}{(2\pi * Fs)^2 * C} \qquad [28]$$

f) Definição através de programa computacional de fluxo de harmônicos dos seguintes parâmetros:

- ✓ Fator de Qualidade do reator e do filtro de harmônicos;

30 < FQ < 150 (fator de qualidade do filtro de harmônicos)

$$FQ_R = \frac{X_L}{R_L} \qquad [29]$$

$$FQ_F = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R_L} \quad [30]$$

Obs: O fator de qualidade do filtro definido é igual a 50.

✓ O Fator de amortecimento para o filtro de 11ª ordem é definido conforme equação abaixo.

$$D = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad [31]$$

- ✓ Máxima dessintonia permitida para ajuste da proteção de desbalanço do equipamento, em valores percentuais de perda de capacitância, definidas pelo fornecedor do filtro de harmônicos;
- ✓ Conteúdo harmônico máximo a ser drenado pelo filtro de harmônicos, após a simulação computacional. Para os 20 anos previstos de operação dos filtros foi definido o conteúdo harmônico máximo igual 120% de In. aa CEB deverá providenciar filtros para a drenagem destas correntes harmônicas crescentes devido o aumento anual das suas cargas elétricas.
- ✓ Definição da tensão fase-fase máxima a ser suportada e da potência total do filtro pelos critérios de tensão máxima e ampacidade, em regime permanente:

$$V_{RMS} = \sum_{V_h=1}^{h \to 51} V_h \quad [32]$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{V_h=1}^{h \to 51} I_h^2} \quad [33]$$

- ➢ Em caso de filtro amortecido, escolha do tipo de filtro para definição dos componentes (capacitores, reatores e resistores) bem como do fator de amortecimento desejado.

ANEXO II - POTÊNCIA DE CURTO CIRCUITO

JOAO WELLISCH

De: Nelson Miranda <#47236@ceb.com.br>
Enviado em: sexta-feira, 4 de abril de 2014 11:23
Para: JOAO WELLISCH
Assunto: ENC: Projeto Básico do MEtrô-DF - Potência de Curto nas barras das SEs CEB

Prezado João Wellisch,

Seguem as informações solicitadas. Os curtos estão na base de 100MVA e 13,8kV na configuração dez/2016. Os valores podem sofrer alterações de acordo com as mudanças de configuração do sistema CEB definidas por nossa área de Planejamento.

Entretanto, procurei estimar a configuração que resultaria nos maiores valores de curto.

RELATORIO DE NIVEIS DE CURTO-CIRCUITO CONFIG DEZ/2016

IDENTIFICACAO NUM.	NOME	VBAS	TRIFASICO MOD(MVA)	TRIFASICO ANG(gr)	MONOFASICO MOD(MVA)	MONOFASICO ANG(gr)	
17382	SE-SO 13.8kV	13.8	320.78	-89.41	328.42	-89.59	(Samambaia Oeste)
17112	SE-AC 13.8kV	13.8	421.34	-88.12	450.80	-88.66	(Águas Claras)
17122	SE-BC 13.8kV	13.8	473.11	-89.34	486.52	-89.55	(Brasília Centro)
17152	SE-CN 13.8kV	13.8	316.78	-89.27	324.42	-89.50	(Ceilândia Norte)
17162	SE-CS 13.8kV	13.8	365.80	-89.39	374.65	-89.58	(Ceilândia Sul)
17422	SE-EN 13.8kV	13.8	256.10	-89.58	260.66	-89.72	(Estádio Nacional)
17372	SE-HP 13.8kV	13.8	253.12	-89.36	258.59	-89.56	(Hípica)

Faixas de Tensão [kV]

SE	TENSÃO NOMINAL	CARGA PESADA MÁX.	CARGA PESADA DESEJ.	CARGA PESADA MÍN.	CARGA MÉDIA MÁX.	CARGA MÉDIA DESEJ.	CARGA MÉDIA MÍN.	CARGA LEVE MÁX.	CARGA LEVE DESEJ.	CARGA LEVE MÍN.
SO	13,8	14,2	14,0	13,8	14,2	13,9	13,6	13,9	13,7	13,5
AC	13,8	14,2	14,0	13,7	14,2	13,9	13,6	14,2	13,9	13,6
CS	13,8	14,2	14,0	13,7	14,2	13,9	13,6	14,2	13,9	13,6
CN	13,8	14,2	14,0	13,9	13,9	13,8	13,6	13,9	13,8	13,6
BC	13,8	13,7	13,4	13,2	13,7	13,4	13,2	13,2	13,0	12,8
HP	13,8	13,6	13,4	13,3	13,6	13,4	13,3	13,6	13,2	13,1
EN	13,8	13,6	13,4	13,2	13,5	13,4	13,1	13,5	13,3	13,1

Informamos ainda que estamos à disposição para quaisquer esclarecimentos adicionais.

Atenciosamente,

Nelson Miranda
CEB Distribuição S/A
Gerência de Engenharia do
Sistema-GRES

Antes de imprimir pense em seu compromisso com o Meio Ambiente

De: Nelson Miranda
Enviada em: segunda-feira, 31 de março de 2014 14:24
Para: 'JOAO WELLISCH'
Assunto: RES: Projeto Básico do MEtrô-DF - Potência de Curto nas barras das SEs CEB

Prezado João,

Tivemos outra prioridade de tabalho aqui na CEB, por isso não pude levantar as informações. Acredito que até sexta-feira, 04/04/2014, encaminharei as informações solicitadas.

Certo de vossa compreensão,

Atenciosamente,

Nelson Miranda
CEB Distribuição S/A
Gerência de Engenharia do