



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/02  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**IMPLICAÇÕES DA ESCOLHA DO PASSO NA DETERMINAÇÃO DO LUGAR GEOMÉTRICO DAS IMPEDÂNCIAS**

**L. C. A. Fonseca (\*)**  
**CHESF**

**V. R. Simoni**  
**CHESF**

**RESUMO**

O objetivo deste informe técnico é apresentar uma análise de Lugares Geométricos das Impedâncias (LG) em que para sua elaboração foram usadas duas condições de passo: 60 Hz e de 1 Hz. Estes LG's foram usados para se realizar estudos de harmônicos de um conjunto de fontes de harmônicos, bem como se calcular as medidas mitigadoras caso os valores dos critérios forem excedidos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Qualidade da Energia, Harmônicos, Lugar Geométrico (LOCUS), Fontes de Harmônicos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Este trabalho visa analisar a importância da escolha dos passos utilizados nos cálculos dos Lugares Geométricos. Num estudo de harmônicos para cargas distorcidas, considerando que uma carga distorcida pode ser representada como fontes de correntes, e que os componentes da rede podem ser considerados lineares, o fluxo das corrente harmônicas pode ser achado através de métodos de análise de rede.

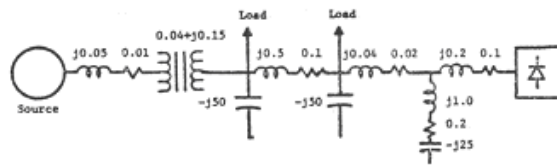
Observa-se que a distorção de tensão pode ser achada pelo produto de corrente harmônica pela impedância, àquela frequência, do componente através do qual a corrente flui.

A distorção de tensão é capaz de alcançar altos valores quando a corrente harmônica encontra um circuito ressonante série ou paralelo. Desde que uma combinação paralela de indutância capacitância apresenta uma alta impedância para a corrente, a distorção de tensão é elevada. Um circuito ressonante série apresenta um baixo caminho para as correntes harmônicas as quais causam distorções elevadas através dos ramos indutivos e capacitivos.

O aumento da distorção será limitado, na maioria dos casos, pelo fator de qualidade do circuito sintonizado. O fator de qualidade pode ser elevado em casos desfavoráveis em sistemas de transmissão, mas é não usual exceder três ou quatro em sistemas de distribuição.

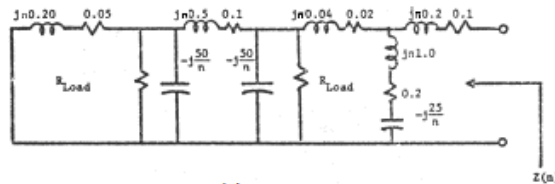
A Figura 1 mostra como componentes indutivos e capacitivos de uma rede de distribuição podem formar circuitos ressonantes série e paralelo, cada um podendo aumentar a distorção harmônica localmente.

(\*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – sala 505 - CHESF Sede - Bloco D – CEP 50761-901 Recife, PE, – Brasil  
Tel: (+55 81) 3229-2607 – Fax: (+55 81) 3229-2393 Email: lfonseca@chesf.gov.br



a)

Exemplo de um Sistema de Distribuição. Todos os Valores de impedância estão em pu 60Hz na base 40MVA



b)

Circuito Equivalente Harmônico do Sistema Mostrado Acima. As cargas estão Representadas por uma Resistência.  $n=1$  frequência pu, com  $n=1$  correspondendo a 60Hz.

Figura 1- Modelagem de uma Rede de Distribuição para Estudos de Harmônicos

É importante ter em mente que o maior valor de distorção não ocorre necessariamente no ponto de conexão da carga distorcida. Ampliação pode ser causada em pontos relativamente remotos de rede e isto deve ser previsto. Três principais métodos de análise podem ser vistos:

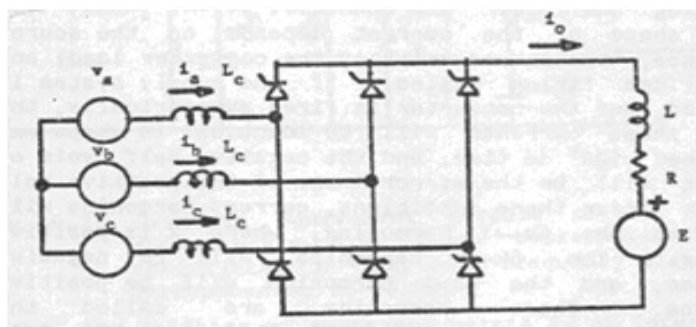
- Simulação não linear no domínio do tempo;
- Modelo linearizado;
- Análise não linear no domínio da frequência.

Estes três métodos utilizam os mesmos modelos básicos dos componentes. Em particular, os elementos lineares, podem ser modelados com a mesma precisão pelos três métodos. Os métodos diferem na complexidade da representação dos elementos não lineares e na especificação do ponto de operação do sistema.

As principais "cargas" não lineares são: os retificadores e os compensadores estáticos.

Analisando a mais utilizada e a aconselhada pelo ONS, ou seja, a técnica da Injeção de Corrente que é um método alternativo à análise não linear, ou seja, linearizando os elementos não lineares do sistema.

O mais comum dos modelos lineares é baseado no conversor mostrado na Figura 2 que considera a corrente constante durante o período de condução e desprezível o período de comutação. Com este modelo a corrente harmônica é função da corrente fundamental e independente da forma de onda da tensão e da impedância para frequência  $6k \pm 1$  com amplitude.



Configuração Típica de um Conversor de Seis Pulsos

Figura 2 - Configuração típica de um Conversor de Seis Pulsos

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

Equação 1

Os harmônicos  $6k-1$  são de sequência negativa e os  $6k+1$  positiva. Com esta linearização, a resposta em regime permanente da rede pode ser encontrada pela superposição das respostas às várias fontes de harmônicos. A análise em regime permanente pode ser empregada, e os harmônicos podem ser tratados separadamente. Quando o estudo envolve uma única fonte, um parâmetro de interesse para muitos estudos é a impedância harmônica nos terminais do conversor.

O sistema de potência é uma rede RLC passiva à frequência harmônica e a solução da impedância harmônica envolve o cálculo da impedância de cada elemento à frequência harmônica e a redução da rede a uma impedância equivalente. Um sistema exemplo é mostrado na Figura 1 bem como o seu circuito equivalente. A impedância harmônica é mostrada em módulo e ângulo na Figura 3 A Figura 4 mostra um diagrama R x X.

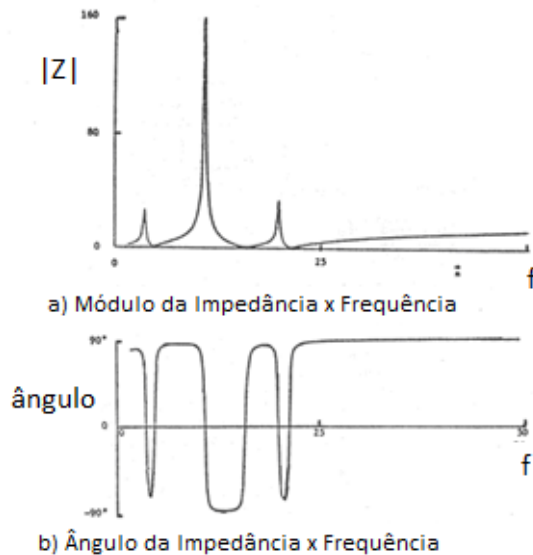
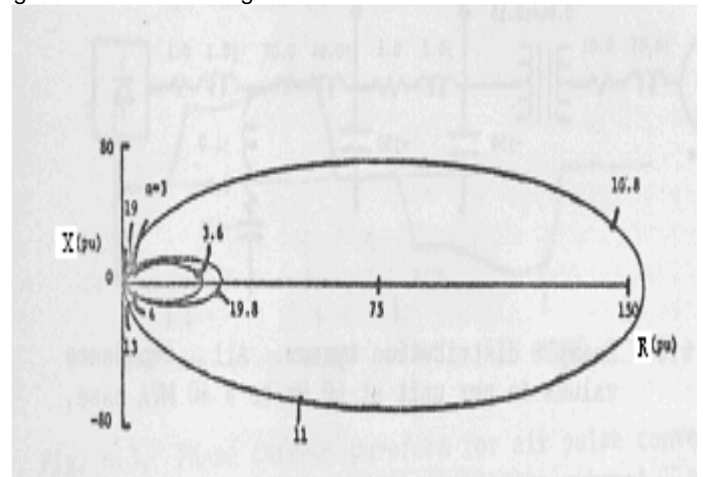


Figura 3 Impedância Harmônica vista de uma barra, Módulo e Ângulo de Z



Impedância do Sistema da Figura 5.2-1 Plotado no diagrama R x X.  
A Carga foi Desprezada

Figura 4 Impedância Harmônica de uma barra, gráfico R x X

A impedância para várias situações da rede forma um conjunto, que é o lugar geométrico das impedâncias (LG) e que é útil no projeto de filtros. A impedância do filtro em paralelo com a impedância da rede é visto pelas correntes do conversor.

Em muitos estudos, entretanto, uma solução mais geral é desejada na qual fluxo das correntes harmônicas e os níveis de tensão no sistema são avaliados. São os estudos de penetração harmônica. Ao se injetar correntes conhecidas na rede podem-se determinar as tensões e correntes nos diversos equipamentos na rede. Com um sistema de  $m$  barras, teremos um sistema de equações algébricas lineares complexas de ordem  $m$  para cada harmônico em estudo. A solução é mais fácil usando as técnicas matriciais que são usadas para a análise de frequência fundamental.

A equação para o  $n$ ésimo harmônico é:

$$I_n = Y_n \cdot U_n$$

Equação 2

Onde,

$$I_n = [I_{1n}, I_{2n}, \dots, I_{mn}]^t$$

Equação 3

e  $I_{jn}$  é a  $n$ ésima corrente harmônica injetada na barra  $j$ , similarmente:

$$V_n = [V_{1n}, V_{2n}, \dots, V_{mn}]^t$$

Equação 4

Com  $V_{jn}$  sendo a  $n$ ésima tensão na barra  $j$ .  $Y_n$  é a matriz admitância para  $n$ ésimo harmônico.

Conhecendo-se as correntes e a matriz admitância a cada frequência de interesse, a tensão da barra pode ser encontrada por inversão de matriz ou outro algoritmo.

A solução para o caso envolver uma matriz  $m \times m$  para cada harmônico de interesse. Uma solução alternativa é achada usando a matriz impedância de barra. A equação se torna:

$$U_n = Z_{busn} \cdot I_n$$

Equação 5

A matriz impedância é:

$$Z_{bus} = Y^{-1} \cdot n$$

Equação 6

As tensões das barras são encontradas diretamente uma vez que se conhece o vetor corrente. Adicionalmente, a impedância própria de cada barra é encontrada nos elementos da diagonal e a impedância de transferência que dá efeito entre as barras de injeção e a de interesse é estimada dos termos fora da diagonal. Com a tensão conhecida por um dos dois métodos as correntes harmônicas nos componentes são conhecidas por se dividir a queda de tensão pela impedância do equipamento. Este enfoque linear é eficiente sob a ótica computacional apesar dos erros devido às considerações da injeção de corrente. Este método é largamente empregado.

## 2.0 - MONTAGEM DE UM LUGAR GEOMÉTRICO

A referência (1) sugere que se considerem, na elaboração do LG, as ordens harmônicas imediatamente inferior e superior à ordem harmônica de interesse, ou seja, a rede não deverá ser reduzida a apenas uma impedância, mas a uma região abrangendo o harmônico anterior e o posterior ao harmônico em estudo. Entretanto, não especifica quantos pontos deverão existir neste intervalo. Em outras palavras, não se define o passo entre o harmônico de interesse e seus limites inferiores e superiores.

A referência (2) sugere passos de 1 Hz e uma tolerância de 2% a 10%.

Estudos de harmônicos na rede elétrica, mais especificamente, estudos para a determinação da tensão harmônica máxima num Ponto de Acoplamento de uma fonte de harmônico ou para a especificação de filtros, normalmente para fontes de alto porte, usa-se a teoria do Lugar Geométrico das Impedâncias. A escolha deste método se deve por se poder abranger todo um LOCUS, o que não é possível com estudos pontuais. Além do mais ao se inverter pode-se usar a periferia do plano GxY para se maximizar a distorção harmônica de tensão.

Para o cálculo deste LG usam-se estudos pontuais: casos bases, emergências, várias configurações e condições de carga. Os pontos obtidos destes estudos determinam o plano.

Olhando-se para um caso particular, a curva de resposta em frequência que o representa pode sofrer deslocamentos dos seus picos de ressonância, tanto da série quanto da paralela, devido a fatores do sistema tais como:

- Manobras de bancos de capacitores e reatores, que deslocam os picos de ressonâncias paralelas. Para esquerda e direita, respectivamente no gráfico  $|Z|_{xf}$ ;
- Condições intermediárias de carga não contida nas simulações;
- Mudanças significativas na configuração da rede, como a inclusão no futuro, não previsto, de um banco de capacitores;
- Imprecisão nos dados dos equipamentos;
- Variação da frequência da rede;
- Variações e tolerância dos filtros.

Daí, deve-se ter o cuidado de se definir um intervalo de frequência em torno da harmônica de interesse para se represente adequadamente as incertezas envolvidas no cálculo deste LG.

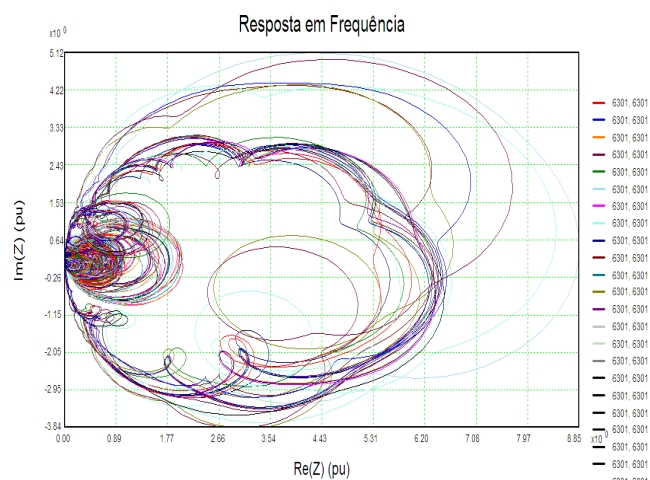
## 3.0 - ESTUDO COMPARATIVO

Para realização daquele estudo foram utilizadas as configurações do PAR ciclo 2015-2017 para as configurações de 2015/2016/2017 nos patamares de carga leve, carga média e carga pesada.

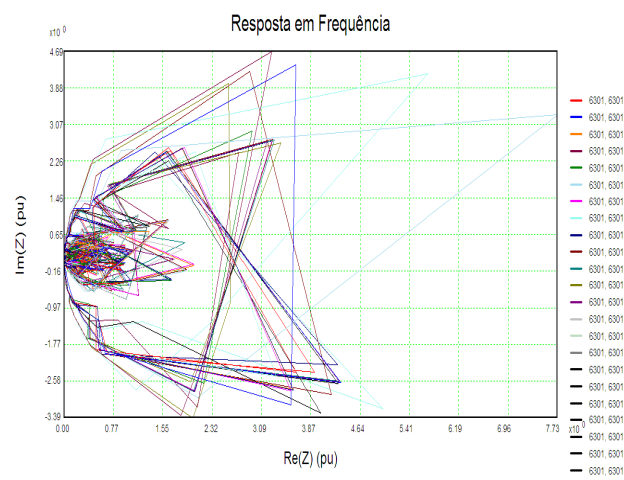
Além dessas condições de carga, correspondendo aos casos base, as seguintes contingências foram levadas em consideração para a obtenção do lugar geométrico.

- LT 500kV L. Gonzaga - Sobradinho
- LT 500kV S.J. Piauí – Sobradinho
- LT 230kV Juazeiro – Sobradinho
- Trafo de S. J. do Piauí 500/230 kV
- Trafo de Sobradinho 500/230 kV
- Trafo de L. Gonzaga 500/230 kV
- LT 230kV Juazeiro – Jaguarari
- LT 230kV Juazeiro - Senhor do Bonfim
- LT 230kV Jaguarari - Senhor do Bonfim
- LT 230kV Senhor do Bonfim – Irecê

Os Lugares Geométricos calculados para um passo de 1 Hz e 60 Hz estão plotados na Figura 5 a seguir. Comparando-as nota-se uma maior riqueza de detalhes no caso de 1 em 1 Hz, bem como maiores valores. Analisando o gráfico de uma condição específica, uma emergência por exemplo, mostrada na Figura 6 e Figura 7 torna-se ainda mais patente a perda de qualidade quando da simulação de 60 em 60 Hz, com a não percepção de varias ressonâncias no caso onde o passo foi de 60 Hz, como era de se esperar.



(a) Lugar Geométrico elaborados com intervalos de 1 Hz



(b) Lugar Geométrico elaborados com intervalos de 60 Hz

Figura 5 Lugares Geométricos elaborados com intervalos de 1 Hz e de 60 Hz



(a) Gráfico  $|z| \times f$  elaborado com intervalo de 1 Hz



(b) Gráfico  $|z| \times f$  elaborado com intervalo de 60 Hz

Figura 6 Gráfico  $|z| \times f$  elaborados com intervalos de 1 Hz e de 60 Hz

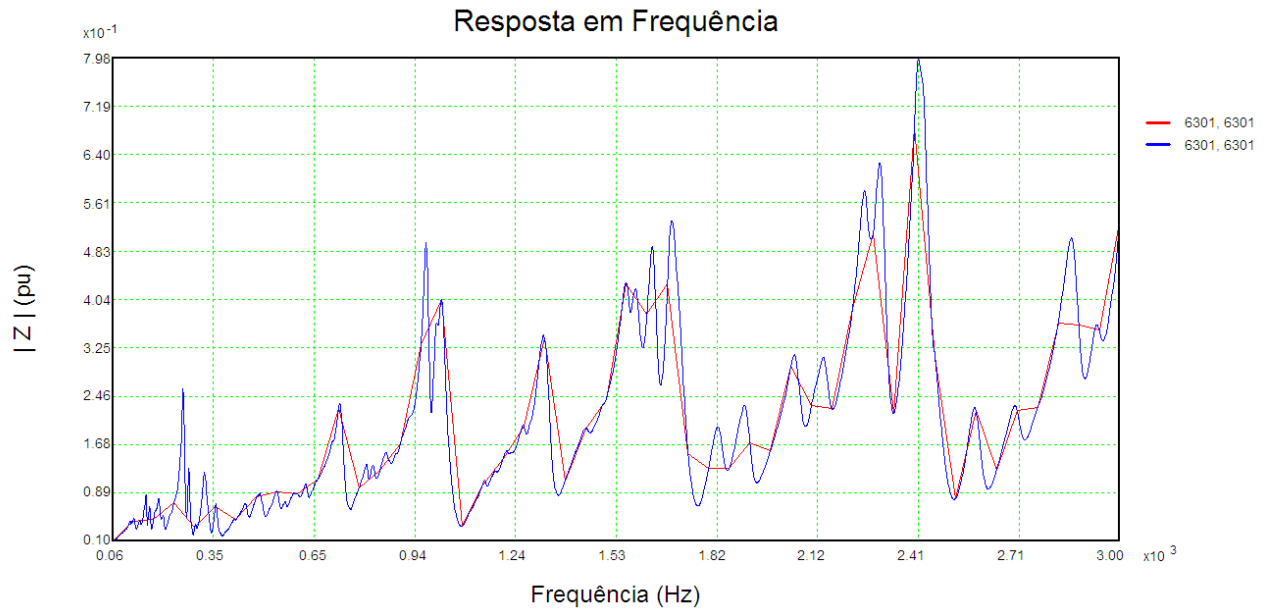


Figura 7 Gráficos  $|z| \times f$  elaborados com intervalos de 1 Hz e de 60 Hz, superpostas.

Observa-se a não percepção de varias ressonâncias no caso onde o passo foi de 60 Hz.

Isto rebate no cálculo, de, por exemplo, um Lugar Geométrico tipo Setor Circular. As tabelas 1 e 2 a seguir mostram estudos com dois LG's deste tipo. Observa-se que os valores obtidos para esta simulação de um setor circular sofreram influência da escolha do passo de tal forma que o passo mais curto (de 1 Hz) levou a observação de dois valores que ultrapassaram os limites de tensão harmônica enquanto para a simulação com o passo mais longo (60 Hz) só foi detectada uma ultrapassagem. Além de que os outros valores de tensões harmônicas apresentaram valores inferiores ao caso anterior.

TABELA 1 – USANDO A SIMULAÇÃO DE 1 Hz EM 1 Hz.

H	In(pu)	Yn		Impedância Harmônica				Distorção (%)	Max	Observação
		Mag(pu)	Ang(grau)	Mag Max	Mag Min	Ang Max	Ang Min			
2	0.00663	0.27638	89.97	0.14487	0.00886	87.50	-6.54	0.10006	0.3	OK
3	0.01249	0.45680	89.95	0.37918	0.02197	84.50	-57.87	0.57228	0.6	OK
4	0.00500	0.71042	89.93	0.42208	0.01341	84.50	-64.35	0.30038	0.3	N OK
5	0.00351	1.12991	89.88	0.42208	0.00857	83.03	-64.51	0.27958	0.6	OK
6	0.00325	2.03325	89.78	0.22930	0.00857	84.65	-64.51	0.13865	0.3	OK
7	0.01393	5.79798	89.38	0.14177	0.01136	84.85	-24.99	0.98716	0.6	N OK
8	0.01780	9.91580	-88.92	0.29477	0.01908	86.30	-24.80	0.19609	0.3	OK
9	0.00710	2.91101	-89.68	0.29477	0.02026	86.30	-29.29	0.21988	0.6	OK
10	0.00346	1.77027	-89.80	0.28777	0.02493	86.62	-30.48	0.11528	0.3	OK
11	0.00221	1.29726	-89.85	0.45025	0.02332	87.82	-30.48	0.11494	0.6	OK
12	0.00059	1.03585	-89.88	0.49540	0.02332	87.82	-19.59	0.03049	0.3	OK
13	0.00160	0.86861	-89.90	0.49540	0.05743	87.78	-37.15	0.09722	0.6	OK
14	0.00033	0.75162	-89.91	0.46793	0.03426	87.97	-37.15	0.01849	0.3	OK
15	0.00070	0.66469	-89.91	1.01456	0.03426	88.14	-36.90	0.08872	0.6	OK
16	0.00018	0.59722	-89.92	1.12503	0.06647	88.14	-51.67	0.03218	0.3	OK
17	0.00032	0.54312	-89.92	1.12503	0.03348	88.12	-61.42	0.06538	0.6	OK
18	0.00013	0.49861	-89.93	0.60528	0.02311	88.12	-61.42	0.01052	0.3	OK
19	0.00014	0.46122	-89.93	0.52720	0.02311	87.10	-37.77	0.00818	0.6	OK
20	0.00009	0.42927	-89.93	0.52720	0.05659	86.39	-1.08	0.00481	0.3	OK
21	0.00007	0.40156	-89.93	0.78794	0.09362	87.65	-47.04	0.00683	0.6	OK
22	0.00008	0.37723	-89.92	1.04378	0.04453	88.64	-62.18	0.01202	0.3	OK
23	0.00008	0.35560	-89.92	1.04378	0.04101	88.64	-62.95	0.01220	0.6	OK
24	0.00004	0.33614	-89.91	1.01842	0.03647	88.77	-62.95	0.00512	0.3	OK
25	0.00005	0.31841	-89.89	0.86060	0.03647	88.77	-29.52	0.00445	0.6	OK
26	0.00004	0.30199	-89.87	0.89067	0.07447	88.21	-31.13	0.00395	0.3	OK
27	0.00004	0.28641	-89.82	1.69162	0.10037	88.24	-42.27	0.00941	0.4	OK
28	0.00003	0.27093	-89.73	1.69162	0.05324	88.24	-64.28	0.00867	0.3	OK
29	0.00009	0.25394	-89.47	1.10670	0.05102	87.39	-64.82	0.01270	0.4	OK

TABELA 2 – USANDO A SIMULAÇÃO DE 60 Hz EM 60 Hz.

H	In(pu)	Yn		Impedância Harmônica				Distorção (%)	Max	Observação
		Mag(pu)	Ang(gra)	Mag Max	Mag Min	Ang Max	Ang Min			
2	0.00663	0.27638	89.97	0.08878	0.01059	84.50	43.60	0.06034	0.3	OK
3	0.01249	0.45680	89.95	0.26862	0.03631	84.50	-57.87	0.38224	0.6	OK
4	0.00500	0.71042	89.93	0.26862	0.01376	84.50	-64.35	0.16566	0.3	OK
5	0.00351	1.12991	89.88	0.26862	0.01353	81.41	-64.35	0.13443	0.6	OK
6	0.00325	2.03325	89.78	0.12304	0.01353	84.30	-64.35	0.05324	0.3	OK
7	0.01393	5.79798	89.38	0.12883	0.01353	84.30	-24.99	0.66386	0.6	N OK
8	0.01780	9.91580	-88.92	0.28777	0.02026	84.47	15.67	0.15598	0.3	OK
9	0.00710	2.91101	-89.68	0.28777	0.02026	84.47	3.69	0.15143	0.6	OK
10	0.00346	1.77027	-89.80	0.28777	0.02857	86.42	-19.59	0.10372	0.3	OK
11	0.00221	1.29726	-89.85	0.41540	0.03113	87.23	-19.59	0.09522	0.6	OK
12	0.00059	1.03585	-89.88	0.46793	0.03113	87.51	-19.59	0.02895	0.3	OK
13	0.00160	0.86861	-89.90	0.46793	0.05743	87.51	-36.90	0.09104	0.6	OK
14	0.00033	0.75162	-89.91	0.46793	0.06647	87.97	-36.90	0.01846	0.3	OK
15	0.00070	0.66469	-89.91	1.01456	0.06647	87.97	-36.90	0.08872	0.6	OK
16	0.00018	0.59722	-89.92	1.01456	0.06647	87.97	-51.67	0.02835	0.3	OK
17	0.00003	0.54312	-89.92	1.01456	0.03403	87.45	-51.67	0.04876	0.6	OK
18	0.00013	0.49861	-89.93	0.60039	0.03403	86.97	-51.67	0.00992	0.3	OK
19	0.00014	0.46122	-89.93	0.51248	0.03403	86.97	-37.77	0.00793	0.6	OK
20	0.00009	0.42927	-89.93	0.51789	0.05659	86.12	-1.08	0.00473	0.3	OK
21	0.00007	0.40156	-89.93	0.75270	0.09362	87.65	-47.04	0.00646	0.6	OK
22	0.00008	0.37723	-89.92	1.01842	0.04486	88.28	-62.18	0.01161	0.3	OK
23	0.00008	0.35560	-89.92	1.01842	0.04101	88.28	-62.18	0.01173	0.6	OK
24	0.00004	0.33614	-89.91	1.01842	0.04101	88.28	-62.18	0.00510	0.3	OK
25	0.00005	0.31841	-89.89	0.86060	0.04101	88.18	-29.52	0.00445	0.6	OK
26	0.00004	0.30199	-89.87	0.86060	0.07447	88.18	-29.52	0.00377	0.3	OK
27	0.00004	0.28641	-89.82	1.10670	0.10387	87.86	-42.27	0.00573	0.4	OK
28	0.00003	0.27093	-89.73	1.10670	0.06056	87.86	-64.28	0.00475	0.3	OK
29	0.00009	0.25394	-89.47	1.10670	0.05732	86.75	-64.28	0.01268	0.4	OK

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Como era de se esperar o detalhamento de 1 em 1 Hz , leva a apresentar maiores distorções, claro por que não retira as possíveis ressonâncias existente durante este percurso. A questão da necessidade ou não de um trecho mais longo não pode ser inferida a partir deste informe, mas a prática mundial, apresentado em (2) mostra a necessidade de uma faixa, detalhada, de pelo menos, 60 Hz antes e depois do harmônico em análise.

#### 5.0 - BIBLIOGRAFIA

(1) ONS, Operador Nacional do Sistema Brasileiro, ONS RE 2.1 057/2008 – VER. 2.

(2) Special Aspects of AC Filter Design for HVDC Systems. An addendum to Guide to the Specification and Design Evaluation of AS filters for HVDC Systems – (Technical Brochure 139, 1999, do Working Group B4.47 ) de outubro de 201

(3) Curso de Transmissão em Corrente Contínua. José Carlos de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia.

#### 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Carlos de Alcântara Fonseca nasceu em 20 de julho de 1953, em Recife, Pernambuco, é engenheiro eletricista formado em 1977 pela UFPE, e especializou-se em Sistema de Potência pelo PTI em 1979.

Mestre em Sistema de Potência pela UFPE, em 2003.

De 1977 a 2015, trabalha no Departamento de Planejamento do Sistema de Transmissão da CHESF, se especializou em estudos de Qualidade da Energia, atualmente está desenvolvendo Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e de Qualidade da Energia.

Suas áreas de interesse são: Compatibilidade Eletromagnética, Transitórios Eletromagnéticos e Qualidade da Energia.