



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GDS/23
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS

**Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos
de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico**

Franklin Clement Veliz(*)
PUC Rio de Janeiro

Sergio Luis Varricchio
CEPEL

Cristiano de Oliveira Costa
CEPEL

RESUMO

Atualmente, nos procedimentos de rede para os novos acessantes que possuam cargas não lineares significativas, o ONS recomenda que os Lugares Geométricos (LGs) das admitâncias da rede básica vistas do ponto de acoplamento comum (PAC) entre o novo acessante e o SIN (Sistema Interligado Nacional), sejam representados por setores circulares. No entanto, normas internacionais recomendam a utilização de polígonos de ' n ' lados para a representação dos LGs, pois alegam que a representação por setores circulares é muito conservativa. Este conservadorismo pode indicar a necessidade da utilização de filtros harmônicos sobredimensionados, o que implica no aumento do custo de instalação do acessante à rede básica.

Neste trabalho é apresentada uma nova metodologia que representa os LGs de admitâncias por polígonos de ' n ' lados. A simplicidade da metodologia proposta facilitou sua implementação computacional, permitindo compará-la com o método dos setores circulares, evidenciando suas vantagens.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, rede básica, método dos lugares geométricos, setores circulares, polígonos de ' n ' lados.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma das formas de avaliar o impacto harmônico devido à conexão à rede básica de um novo acessante que possua cargas não lineares significativas, consiste na utilização do Método dos Lugares Geométricos (MLG) [1], [2]. A utilização deste método resulta em uma avaliação conservadora do impacto provocado pelas cargas não lineares do novo acessante, onde o mesmo é representado por um equivalente de Norton e a rede básica por um lugar geométrico de admitâncias.

Este método é bastante abrangente e permite considerar diversas situações de rede tais como diferentes anos, patamares de carga e situações de contingência (perda de linhas de transmissão, transformadores, bancos de capacitores, etc.). Também é possível a consideração de diversos modelos de carga linear. Do mesmo modo, permite avaliar o desempenho no PAC devido à instalação de novos filtros ou perda de filtros existentes. Além disto, esta metodologia leva em consideração as possíveis alterações ou mudanças das admitâncias devido à imprecisões de modelagem dos elementos que compõem o sistema. Entende-se que com estas considerações consiga-se retratar a variação da admitância vista do PAC durante grande parte da vida útil da instalação.

Procura-se com este método situações que minimizem o valor da admitância equivalente (carga e rede) vista do PAC, de maneira a maximizar o valor da tensão harmônica resultante. Desta forma, o valor máximo da distorção harmônica depende da forma geométrica adotada para o LG de admitâncias.

* CEPEL - Av. Horácio Macedo 354, Cidade Universitária - CEP: 21941-911 - Rio de Janeiro, RJ.
Tel: +55-21-2598-6214, Fax: +55-21-2598-6451, email: franklin@cepel.br

Atualmente, nos procedimentos de rede, o ONS recomenda que os LGs sejam representados por setores circulares. No entanto, normas internacionais recomendam a utilização de polígonos de ' n ' lados para a representação dos LGs [3], pois alegam que a representação por setores circulares é muito conservativa. Este conservadorismo, via de regra, indica a necessidade da utilização de filtros harmônicos sobredimensionados, o que implica no aumento do custo de instalação do acessante à rede básica.

Uma das vantagens da utilização dos setores circulares é que, dada uma nuvem de pontos de admitâncias no plano $G \times B$ (condutância \times susceptância), só existe uma forma de traçá-lo. Esta unicidade é de fundamental importância para a uniformização dos estudos de acesso. Por outro lado, as normas internacionais não definem como o polígono de ' n ' lados deve ser traçado. Esta multiplicidade no traçado destes polígonos de admitâncias pode fazer com que o estudo de impacto harmônico de um mesmo acessante possa apresentar diversos resultados, dependendo de como o polígono é traçado.

Neste trabalho é proposta uma metodologia que define de forma única o traçado dos polígonos de ' n ' lados de admitâncias. O polígono proposto, em princípio, apesar de ser menos conservador que o setor circular, é dentre todos os polígonos de ' n ' lados possíveis de ser traçados, o mais conservador, pois produz a maior área tendo como vértices pontos da nuvem de admitâncias.

Implementou-se a metodologia proposta em um programa em Matlab que, utilizado juntamente com o programa HarmZs do CEPEL [4], permite que estudos de acesso sejam realizados representando os LGs por polígonos de ' n ' lados. Desta forma, além da metodologia proposta, neste trabalho serão apresentados casos comparando a utilização dos setores circulares e destes polígonos, evidenciando as vantagens do uso da metodologia proposta.

2.0 - O MÉTODO DOS LUGARES GEOMÉTRICOS

O MLG é o recomendado pelo ONS nos procedimentos de rede para os estudos de comportamento harmônico de novos acessantes à rede básica que possuam cargas não lineares significativas. Esta instituição sugere utilizar os níveis de carga leve, média e pesada para um horizonte de três anos futuros de operação.

Na construção destes LGs, devem-se considerar grupos de frequências. Tais grupos devem ser constituídos de frequências adjacentes. Assim, por exemplo, para o quinto harmônico deve-se considerar também os harmônicos quarto e sexto na construção do seu LG. Este procedimento objetiva considerar ressonâncias que, por eventuais erros (incertezas) de modelagem, não seriam capturadas se apenas a frequência em análise fosse considerada.

No MLG o impacto harmônico de um novo acessante é avaliado utilizando o equivalente de Norton da sua rede (rede interna) em paralelo com as admitâncias harmônicas da rede básica (rede externa) vistas do PAC, conforme mostrado na Figura 1. Nesta figura, $I(h)$ e $Y_i(h)$ denotam a corrente e a admitância de Norton da rede interna. Por outro lado, $Y_e(h)$ denota a admitância da rede externa representada por seu LG. Estas grandezas devem ser determinadas para cada harmônico h de interesse (2º até o 50º harmônico).

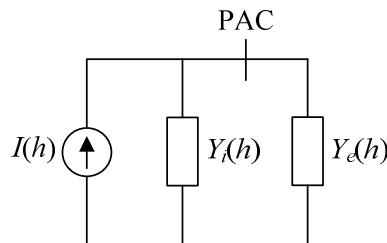


Figura 1: Equivalente do acessante conectado à rede básica

O valor da corrente $I(h)$ é calculado a partir das correntes geradas pelos equipamentos não lineares presentes na rede interna. Os valores destas correntes geradas podem ser obtidos através de medições realizadas nas instalações ou calculados, considerando situações operativas que os maximizem. Em geral, estes valores de corrente são fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos não lineares.

O objetivo deste método é encontrar o máximo valor possível de distorção harmônica no PAC, para cada harmônico h de interesse. Esta distorção máxima é dada matematicamente por:

$$d_{\max}(h) = \frac{I(h)}{Y_{\min}(h)} \times 100 \% \quad (1)$$

onde $I(h)$ e $Y_{\min}(h)$ estão em pu e:

$$Y_{\min}(h) = Y_i(h) + Y_{e\min}(h) \quad (2)$$

O valor mínimo $Y_{\min}(h)$ da admitância harmônica equivalente entre as admitâncias da rede interna e externa pode ser determinado geometricamente no plano $G \times B$ (condutância \times susceptância) como a menor distância do extremo do fasor $-Y_i(h)$ ao LG de admitâncias harmônicas da rede externa. O cruzamento de $Y_{\min}(h)$ com o LG determina $Y_{e\min}(h)$. Note que os fasores $Y_{\min}(h)$ e $Y_{e\min}(h)$ são perpendiculares. Estas admitâncias estão mostradas na Figura 2.

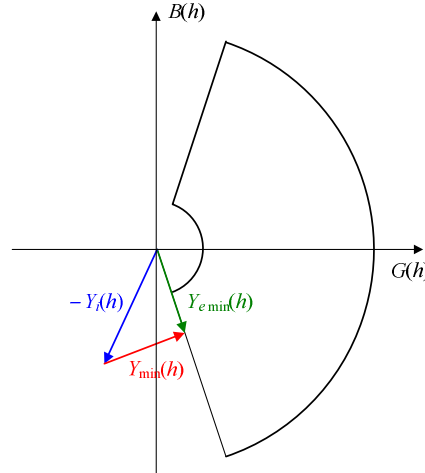


Figura 2: Ilustração gráfica do MLG considerando o setor circular

Para a construção dos LGs, várias formas geométricas podem ser utilizadas. Dentre elas destacam-se os setores circulares e os polígonos. Deve-se observar que estas formas gráficas envolvem todos os pontos de admitâncias calculados para cada harmônico de interesse assim como para seus harmônicos adjacentes anterior e posterior.

2.1 Método do Setor Circular

As envoltórias dos LGs modelados por setores circulares são facilmente obtidas. Para isto, basta determinar as quatro admitâncias da nuvem de pontos (cada ponto representando uma condição de operação do sistema, íntegro ou em contingência) que possuam o maior módulo, menor módulo, maior ângulo e menor ângulo, conforme mostrado na Figura 3.

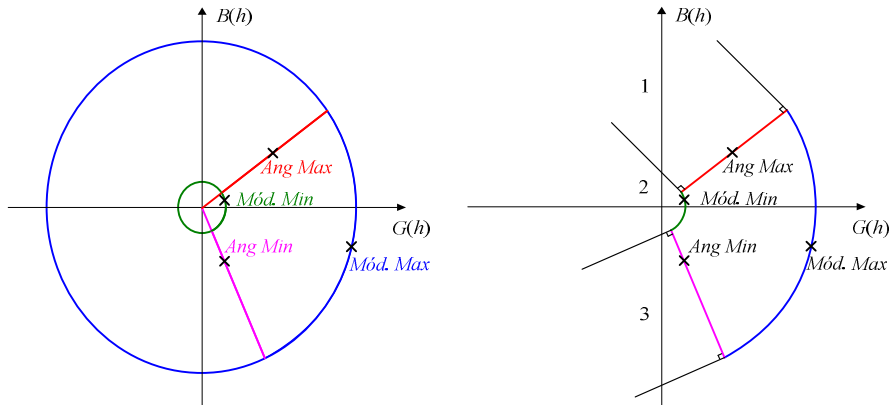


Figura 3: Método dos Setores Circulares

Note que o setor circular assim definido, contém toda a nuvem de pontos de admitâncias representativos dos casos base e de contingências. No entanto, normalmente, não é praticamente possível se considerar todos os casos base e todas as contingências na construção desta nuvem de pontos. Assim, o setor circular é traçado de modo a conter não somente a nuvem de pontos construída, como também eventuais casos bases e contingências não considerados. Todavia, podem existir regiões do setor circular muito afastadas da nuvem de pontos de admitâncias, sendo pouco provável que, na realidade, possam existir pontos de admitâncias nestas regiões (sobredimensionamento). Este fato pode levar a valores de distorções de tensão extremamente elevados. Por outro lado, podem existir pontos de admitância próximos à origem não considerados pelo setor circular, devido ao seu formato em arco nesta região. Neste caso, os resultados de distorções de tensão serão poucos conservativos. Este excesso de conservadorismo ou a falta dele depende do posicionamento relativo entre o setor circular e a admitância da rede interna, como será mostrado a seguir.

2.1.1 Vantagens da Utilização do Setor Circular:

- Obtenção de forma unívoca.
- Simplicidade na sua implementação computacional.

2.1.2 Desvantagens da Utilização do Setor Circular

Para o cálculo do $Y_{\min}(h)$ o setor circular é dividido em três regiões definidas pelas assíntotas perpendiculares às retas que definem os ângulos máximo e mínimo, conforme mostrado na Figura 3. De modo geral, quando a rede interna ($-Y_i(h)$) pertence às regiões 1 ou 3, as distorções de tensão tendem a apresentar um elevado conservadorismo, devido ao sobredimensionamento do LG produzido pelo setor circular, conforme mostrado nos diagramas (a) e (b) da Figura 4. No caso em que a rede interna pertença à região 2, conforme mostrado no diagrama (c) da Figura 4, as distorções de tensão tendem a ser pouco conservativas, pois o formato em arco do setor circular no entorno da origem pode deixar de considerar possíveis ressonâncias paralelas, justamente onde o conservadorismo da envoltória utilizada deveria ser elevado.

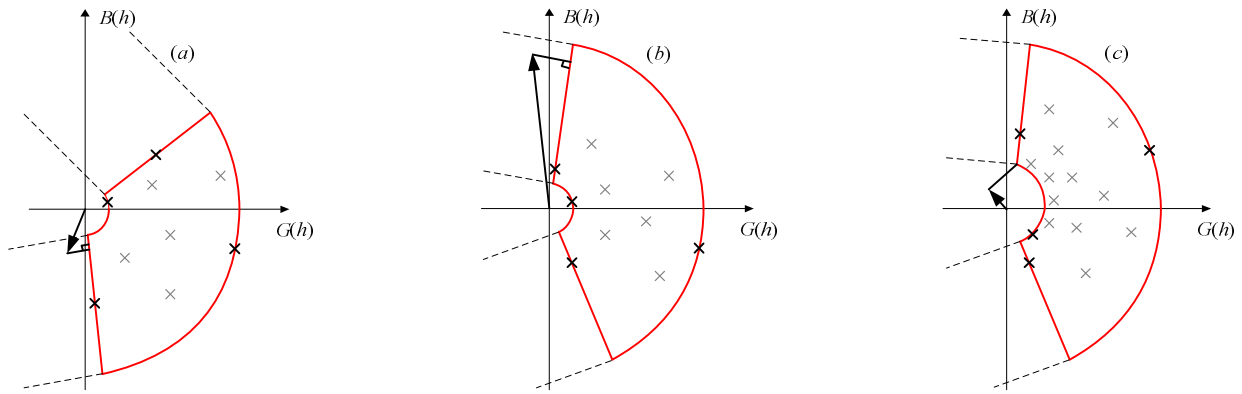


Figura 4: Desempenho dos setores circulares

2.2 Método do Polígono de 'n' Lados Proposto

Normas internacionais sugerem a utilização de polígonos de 'n' lados para uma representação mais realista da rede elétrica [3].

O principal problema da utilização destes polígonos é que estas normas não indicam como gerá-los. Desta maneira, neste trabalho, é proposta uma nova metodologia para a representação de redes elétricas por polígonos de 'n' lados de admitâncias para estudos de impacto harmônico. A metodologia proposta é baseada em dois conceitos matemáticos simples. O primeiro conceito é de deslocamento de eixos coordenados cartesianos e o segundo de produto escalar de vetores.

2.2.1 Deslocamento de eixos coordenados cartesianos:

As coordenadas (x, y) de um ponto genérico num novo referencial (x_1, y_1) , devidas ao deslocamento de eixos no plano cartesiano $'xy'$ desde a origem $(0,0)$ até este referencial, são dadas por $(x-x_1, y-y_1)$.

2.2.2 Produto escalar de vetores:

A representação de admitâncias por vetores no plano $G \times B$, possibilita a utilização de suas propriedades, como o produto escalar entre vetores

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b} = ab \cos(\theta) \quad (3)$$

onde \mathbf{a} e \mathbf{b} são vetores representativos de admitâncias, a e b são seus módulos e θ o ângulo entre eles.

2.2.3 Metodologia proposta

Esta metodologia pode ser descrita em cinco passos, conforme descritos a seguir.

O primeiro passo consiste em escolher qualquer admitância da nuvem de pontos como origem, através do deslocamento de eixos. A partir desta origem, são avaliados os ângulos de todas as admitâncias da nuvem, conforme mostrado na Figura 5.

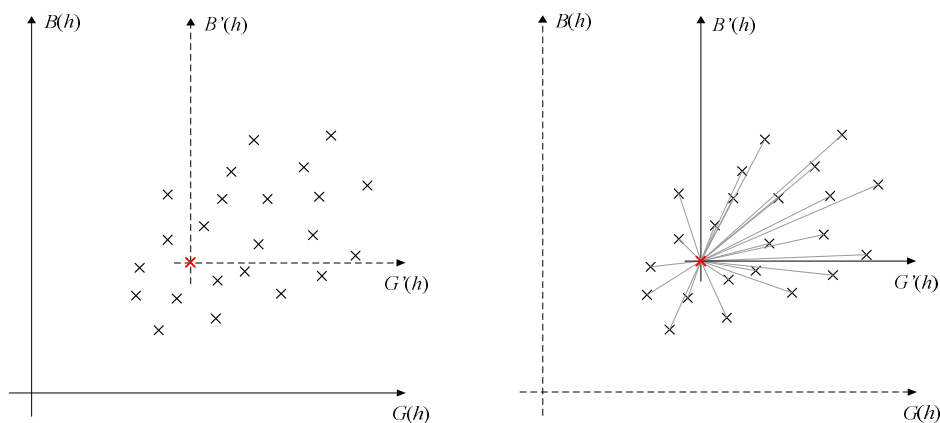


Figura 5: Primeiro passo da metodologia proposta

O segundo passo consiste em escolher a admitância cujo ângulo é o menor dentre todos os avaliados.

O terceiro passo consiste em transformar a coordenada não nula desta admitância na origem de um novo par de eixos coordenados. Note que a antiga coordenada nula (antiga origem) passará a ser o extremo de um vetor admitância no novo referencial, conforme mostrado na Figura 6. Neste trabalho, denominou-se este vetor de vetor base, que será utilizado no quarto passo.

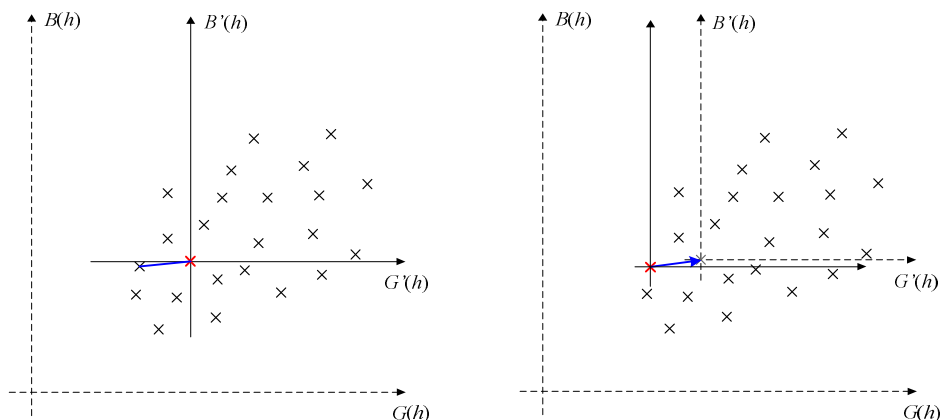


Figura 6: Segundo e terceiro passos da metodologia proposta

O quarto passo consiste em avaliar os ângulos de todas as admitâncias neste novo referencial, utilizando o produto escalar de cada uma delas com o vetor base determinado no terceiro passo, de modo a identificar a admitância que forma o maior ângulo com este vetor, conforme mostrado na Figura 7. Observa-se que esta admitância, responsável pelo maior ângulo, passará a ser a nova referência de mais um deslocamento de eixos coordenados. Novamente, a antiga origem passará a ser o extremo do vetor admitância base no novo referencial, conforme mostrado na Figura 8.

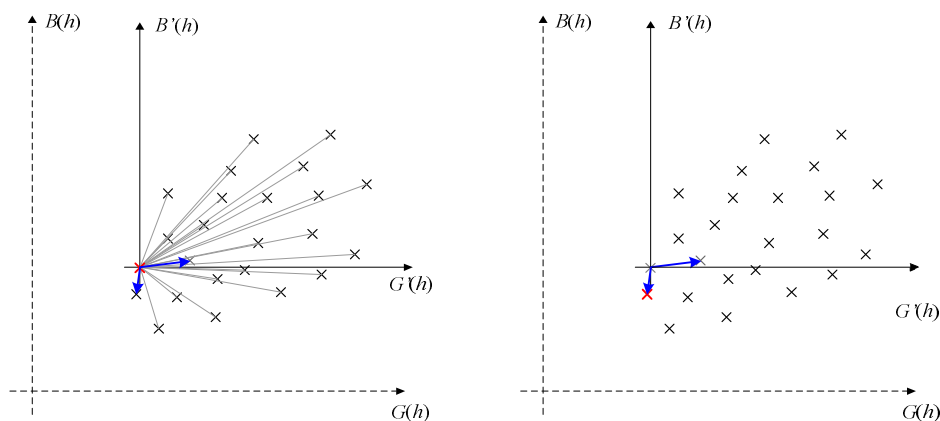


Figura 7: Quarto passo da metodologia proposta

O quinto e último passo consiste na repetição dos passos três e quatro para o novo vetor base, conforme mostrado na Figura 8.

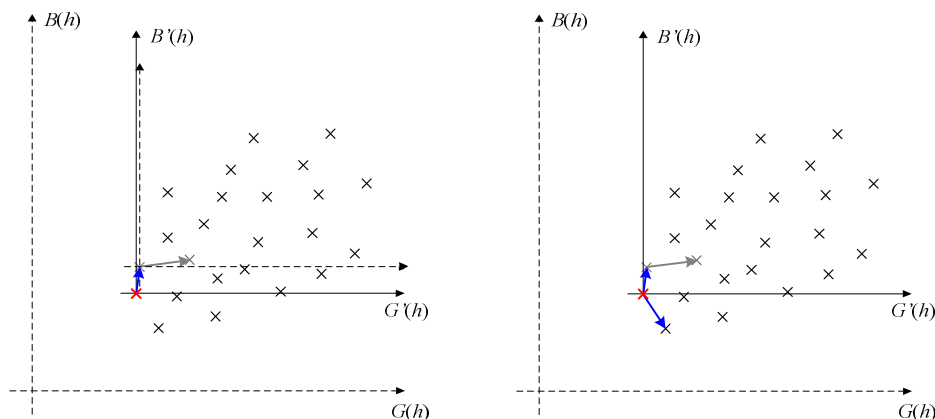


Figura 8: Quinto passo da metodologia proposta

Desta maneira, a metodologia é aplicada até que o polígono de ' n ' lados seja formado, conforme mostrado na Figura 9. Observa-se que o polígono é formado pela ligação de todos os pontos extremos da nuvem de pontos de admitâncias.

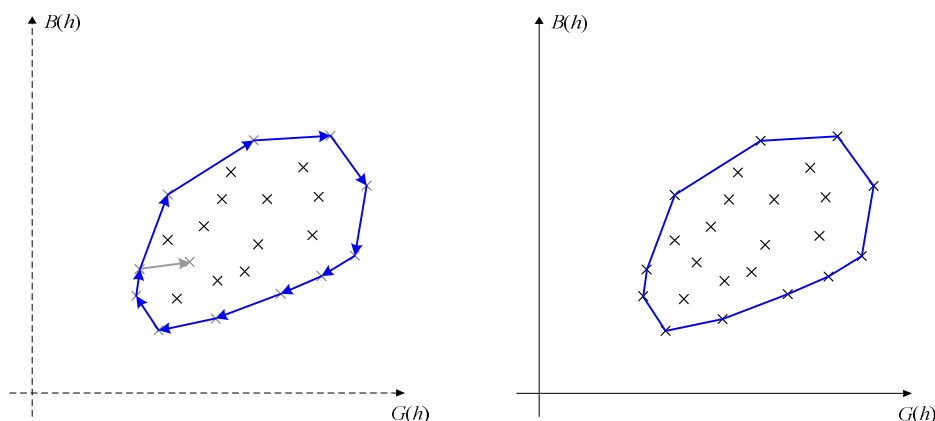


Figura 9: Resultado da metodologia proposta

2.2.4 Comparação do setor circular com o polígono de ' n ' lados proposto

Aos diagramas de LGs, representados por setores circulares mostrados na Figura 4, foram superpostos os polígonos propostos, conforme mostrado na Figura 10.

Nos esquemas (a) e (b) desta figura, observa-se que o conservadorismo elevado dos setores circulares é reduzido consideravelmente pelos polígonos propostos, pois os aumentos das distâncias mínimas entre a rede interna e os LGs foram significativos. Por outro lado, o baixo conservadorismo do setor circular mostrado no esquema (c), é resolvido pelo polígono proposto, pois a distância mínima entre a rede interna e o LG foi reduzida.

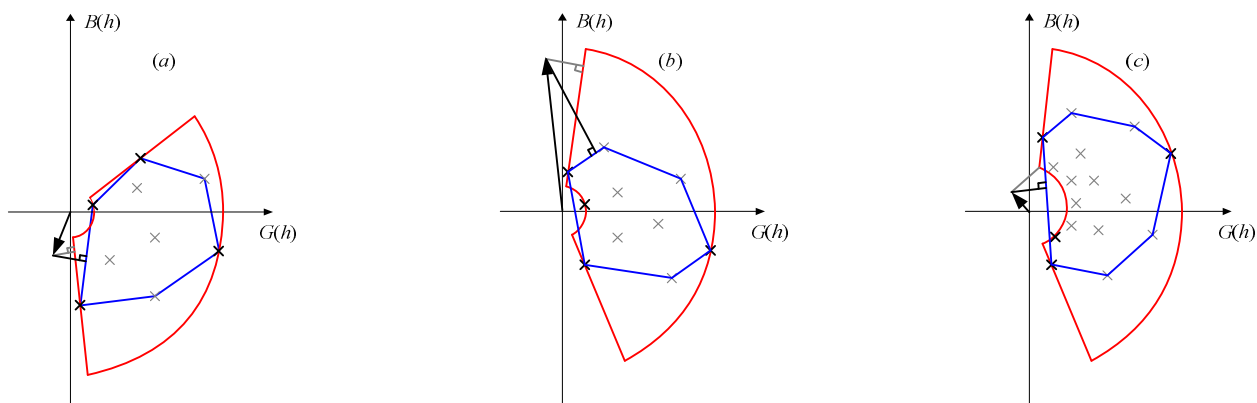


Figura 10: Comparação entre os setores circulares e os polígonos propostos

2.2.5 Vantagens da utilização do Polígono Proposto

- Representa a rede externa de forma mais realista, pois seu formato se ajusta melhor aos pontos da nuvem de admitâncias.

- Da mesma forma que o método do setor circular, o polígono proposto é determinado de forma unívoca, ou seja, existe apenas uma maneira de ser determinado.

- Similarmente ao método do setor circular, a implementação computacional do polígono proposto é simples, conforme descrito nos passos para sua obtenção.

Diferentemente do setor circular, pode obter valores de distorções harmônicas de tensão mais prováveis de ocorrerem na realidade, evitando, em muitos casos, o projeto sobredimensionado de filtros causado pelo excessivo conservadorismo.

2.2.6 Desvantagens da utilização do Polígono Proposto:

- Inexistência de margem de segurança na construção do LG para o polígono proposto.

A representatividade do polígono proposto pode ser aumentada, implementando-se três medidas simples.

- Considerar, para cada caso analisado, os dois valores máximos de impedância (valores mínimos de admitância) existentes entre o harmônico de interesse e os harmônicos adjacentes anterior e posterior.

- Ampliar o horizonte de estudo, considerando todos os anos futuros disponíveis no ONS e na EPE, ao invés de apenas três anos futuros.

- Estabelecer uma margem de segurança no traçado do polígono proposto. Desta forma, o polígono, como descrito neste trabalho, ficaria circunscrito ao polígono que considera uma margem de segurança.

3.0 - RESULTADOS

A simplicidade da metodologia proposta possibilitou sua implementação no MATLAB que, em conjunto com o HarmZs, permitiram simular casos reais como exemplos. O objetivo destas simulações, além de comprovar as vantagens da metodologia proposta quando comparada com a metodologia do setor circular, foi avaliar a robustez, desempenho e a viabilidade de uma futura implementação da metodologia proposta no programa HarmZs do CEPEL.

No Caso1, mostrado na Figura 11, foi avaliado o desempenho de um sistema real para o segundo harmônico. Neste caso, houve violação do limite para este harmônico (0,3% e 0,6% para harmônicos pares e ímpares, respectivamente) em ambas as metodologias utilizadas, conforme mostrado no esquema (a) da Figura 11 e na Tabela 1.

Tabela 1: Distorção de tensão (%) para o Caso 1

Caso	Freq (Hz)	h	Esquema (a)		Esquema (b)	
			Setor Circular	Polígono	Setor Circular	Polígono
1	120	2	5,1188	3,6585	0,35724	0,20073

Para atenuar as distorções de tensão, foi projetado um filtro de 6 MVar de sintonia simples, sintonizado no 2º harmônico, cujos resultados são mostrados no esquema (b) da Figura 11 e na Tabela 1, onde observa-se que o polígono proposto produz uma distorção de tensão bem abaixo do limite estabelecido, significando que o dimensionamento deste filtro poderá ser reduzido substancialmente. Por outro lado, o setor circular ainda está acima do limite, significando que deverá haver um aumento relevante no dimensionamento deste filtro, até atender ao limite.

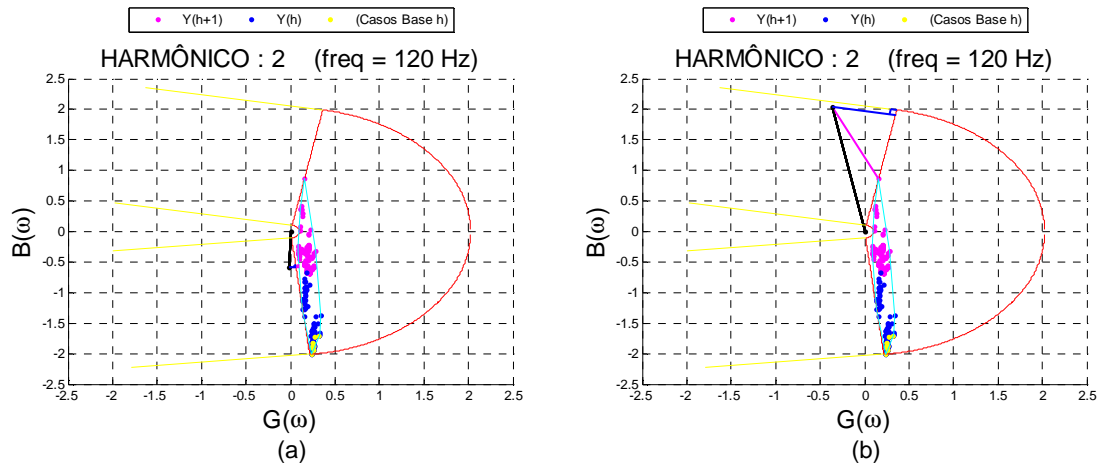


Figura 11: Comparação no dimensionamento do LG, Caso 1

Os Casos 2, 3 e 4, descritos a seguir, são os resultados de simulações de sistemas reais, onde nenhuma medida como a inserção de filtros foi adotada, de modo a atenuar as distorções de tensão. Nas respectivas figuras destes casos, são mostrados os LGs e suas envoltórias e no lado direito a ampliação dos mesmos.

Os Casos 2 e 3, mostrados na Figura 12 e Figura 13, respectivamente, lidam com harmônicos de grande importância, pois é comum encontrá-los circulando em redes elétricas. A partir destas figuras, observa-se que enquanto o polígono proposto se ajusta bem à nuvem de pontos de admitâncias, o setor circular introduz enormes folgas, produzindo distorções de tensão muito maiores que o polígono proposto, conforme mostrado na Tabela 2.

Uma justificativa para as folgas características do setor circular poderia ser que as mesmas representam margens de segurança. No entanto, as dimensões destas folgas tornam estas margens de segurança extremamente conservadoras, gerando resultados improváveis de serem encontrados na realidade.

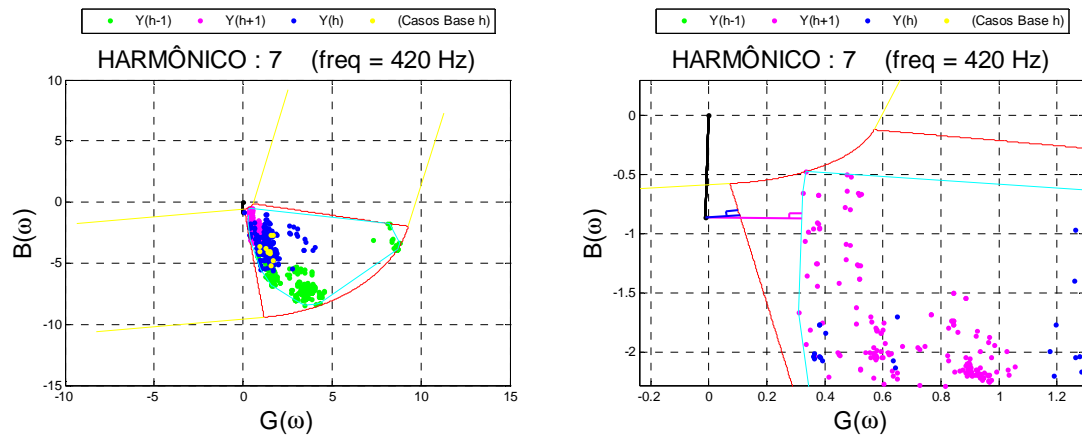


Figura 12: Comparação no dimensionamento do LG, Caso 2

Tabela 2: Distorção de tensão (%) para os Casos 2, 3 e 4

Caso	Freq (Hz)	h	Setor Circular	Polígono
2	420	7	6,2264	2,2439
3	660	11	0,91617	0,27398
4	780	13	0,45488	0,52954

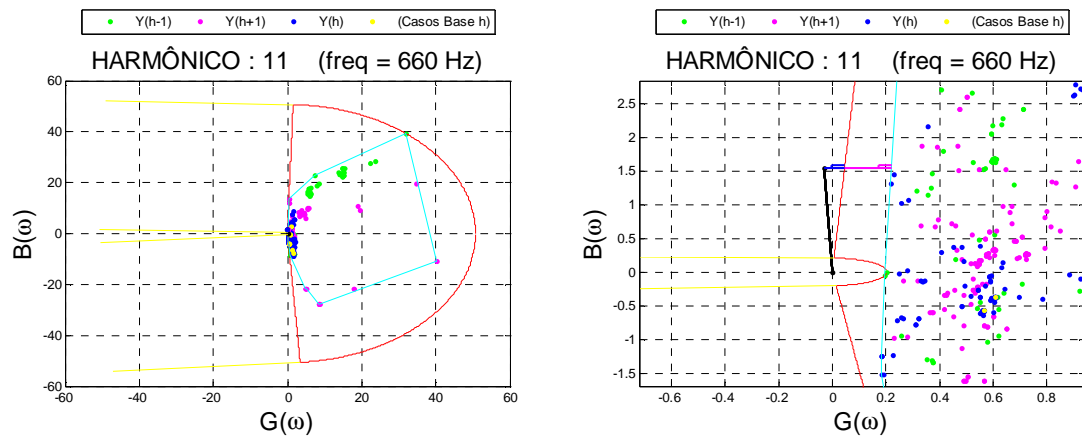


Figura 13: Comparação no dimensionamento do LG, Caso 3

No último caso exemplo (Caso 4), foram consideradas nas simulações um amplo horizonte de operação para o novo acessante e para o SIN, isto é, além dos casos disponibilizados pelo ONS, também utilizaram-se os casos da EPE. Conforme mostrado na Figura 14, observa-se que a nuvem de pontos de admitâncias está muito próxima de assumir a forma do polígono proposto, verificando a precisão da representação do LG pelo polígono proposto.

Observa-se, também, nesta figura (ampliação) que o polígono envolve grande parte do setor circular próximo à origem do plano $G \times B$, considerando possíveis ressonâncias paralelas não consideradas pelo setor circular devido ao seu formato em arco. Desta maneira, o polígono proposto se mostrou mais conservador que o setor circular, produzindo uma distorção maior, conforme mostrado na Tabela 2.

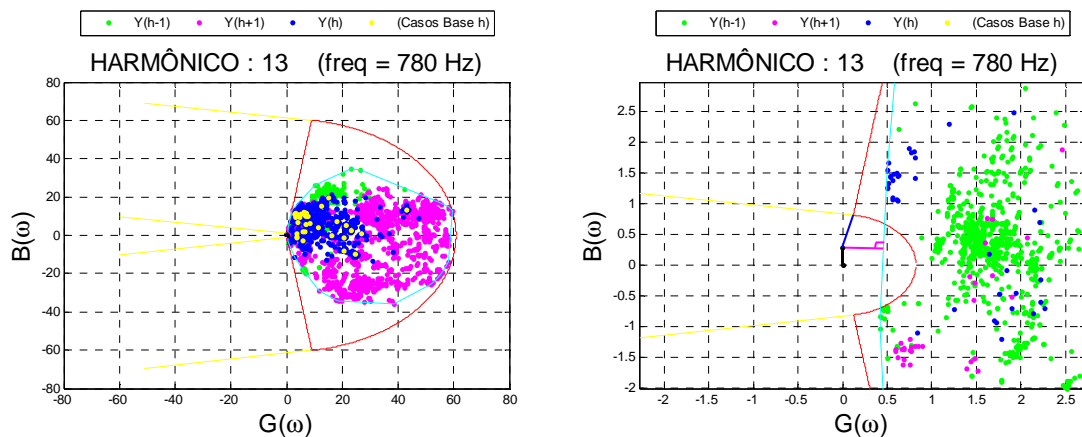


Figura 14: Comparação no dimensionamento do LG, Caso 4

4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta a modelagem de redes elétricas por polígonos de admitâncias de ' n ' lados. Foi demonstrado que o polígono representa de forma mais realista a rede externa do que o setor circular, atualmente adotado nos procedimentos de rede. Três medidas simples podem tornar o polígono proposto mais conservador: considerar, para cada caso analisado, os dois valores máximos de impedância existentes entre o harmônico de interesse e os harmônicos adjacentes anterior e posterior, ampliar o horizonte de estudo e estabelecer uma margem de segurança no traçado do polígono proposto.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da Rede Básica e de seus componentes – ONS – Operador Nacional do Sistema – www.ons.org.br.
- [2] Cristiano de Oliveira Costa, Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio e José Roberto de Medeiros, "Avaliação do Desempenho Harmônico de Cargas Não Lineares Utilizando o Programa HarmZs", XII SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, 20 a 23 de Maio de 2012.
- [3] Guide to the Specification and Design Evaluation of A.C. Filters for HVDC Systems.- Publicly Available Specification - Pre-Standard – IEC PAS 62001 first edition 2004-07
- [4] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, "Manual do Usuário da Versão 1.7 do Programa HarmZs", Relatório Técnico CEPEL, No. DSE 51747 / 2007.