



**XXIV SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/23

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

Desenvolvimento de Funcionalidades Computacionais para Atendimento dos Novos Procedimentos de Rede para Estudos de Desempenho Harmônico

Cristiano de Oliveira Costa (*)	Sergio Luis Varricchio	Franklin Clement Véliz	Fabiano Andrade Oliveira
CEPEL	CEPEL	CEPEL	ONS

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento no programa HarmZs do Cepel de uma interface gráfica extremamente amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos de acesso de novas instalações à Rede Básica, considerando simultaneamente lugares geométricos (LGs) de admitâncias na forma de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos Procedimentos de Rede (PR).

A flexibilidade da ferramenta, sua facilidade de utilização e velocidade de processamento tornam possíveis análises de sensibilidades mais rigorosas e detalhadas em relação a parâmetros como intervalo harmônico e passo de frequência, utilizados na construção dos LGs. Assim, os usuários e o próprio ONS podem utilizar o programa como ferramenta de aprimoramento dos PR atuais, uma vez que estes tendem a ser dinâmicos de acordo com a evolução do sistema.

Além da interface gráfica desenvolvida, serão apresentadas também, de forma didática, suas facilidades através de exemplos de traçados de setores e polígonos utilizando um caso real.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos, Procedimentos de Redes, HarmZs, Lugares Geométricos, Interface Gráfica

1.0 - INTRODUÇÃO

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, com o intuito de atender às necessidades de melhoria do processo de gerenciamento da emissão de harmônicos, criou uma nota técnica [1] em complemento aos PR – submódulo 2.8 relativo à qualidade de energia elétrica. Esse novo documento procura flexibilizar os PR de forma a atender às constantes reivindicações dos agentes no sentido de tornar a forma de avaliação dos estudos de desempenho harmônico menos conservadora e mais alinhada às normas internacionais de grande relevância técnica.

Dentre as implementações inseridas no novo documento, destaca-se a possibilidade de se utilizar, além dos setores angulares, polígonos de n lados [2] para a representação dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Deve-se observar que os intervalos harmônicos e os passos de frequência sugeridos neste novo documento, que serão utilizados para a determinação e traçado de cada tipo de LG (setor angular ou polígono de n lados), necessários para o cálculo das máximas distorções harmônicas de tensão, são diferentes entre si.

Desta forma, para que o programa HarmZs do CEPEL [3], que é indicado pelo ONS como ferramenta de execução dos estudos de comportamento harmônico, pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos de acesso, a metodologia descrita em [2], para determinação e traçado destes polígonos, foi implementada na versão 3.0 do programa.

Além da implementação do método do polígono de n lados, foi desenvolvida uma interface gráfica extremamente amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos PR. Desta forma, o usuário poderá optar pelo LG que lhe for mais conveniente em relação à necessidade de se adotar medidas mitigadoras como a utilização de filtros passivos, sem praticamente nenhum esforço adicional. Por meio desta interface, é possível realizar traçados de LGs de todas as frequências desejadas de uma só vez e de forma bastante automatizada. As grandezas que definem os LGs (módulos e ângulos de admitâncias mínimos e máximos para os setores angulares, e vértices de admitâncias para os polígonos de n lados), bem como as contingências que as geraram, são também apresentadas na interface.

Outra facilidade importante desta interface é a apresentação de todos os resultados de forma tabular, destacando-se na cor vermelha todas as distorções harmônicas individuais (DHI) e totais (DHT) que ultrapassaram os limites adotados nos PR. É também possível exportar todos os resultados obtidos para o Excel para que os usuários possam fazer comparações mais detalhadas e preparar relatórios de forma fácil e rápida.

Neste trabalho, além da interface gráfica desenvolvida, serão apresentadas também, de forma didática, suas facilidades através de exemplos de traçados de setores e polígonos utilizando um caso real.

2.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCEDIMENTOS DE REDE

O método dos lugares geométricos de admitâncias (MLG), adotado nos PR, objetiva determinar majorantes para as distorções harmônicas individuais e total. Portanto, o MLG não pretende obter o valor de uma determinada distorção harmônica para uma determinada topologia de rede, que posteriormente poderia ser verificado por meio de medições, que são fotografias do comportamento harmônico do sistema válidas apenas para os períodos em que foram realizadas estas medições. Neste sentido, são consideradas, para cada harmônico de interesse (do 2° ao 50°), diversas contingências e diversos cenários de carga. Além disto, são consideradas as configurações do Sistema Interligado Nacional (SIN) para o ano de entrada em operação da nova instalação e mais 2 anos à frente. Além das admitâncias geradas por estas diversas topologias, são consideradas também aquelas provenientes de eventuais erros de dados ou de modelos de componentes de rede. Para exemplificar, considere a impedância Z (ou admitância Y) de um circuito RLC paralelo. Obviamente, Z é função de R , L , C e f_h , sendo f_h a frequência harmônica considerada. Note que, neste caso, a maior distorção harmônica de tensão se dá quando $f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (frequência de ressonância do circuito). Note, também, que considerar uma variação ΔL em L ou uma variação ΔC em C , é equivalente a considerar uma variação Δf_h em f_h . Portanto, para a obtenção destes majorantes, são consideradas diversas variações em f_h . Obviamente, quanto menor o passo Δf_h maiores as chances de se encontrar a ressonância do circuito RLC em questão. Outro parâmetro que afeta as chances de se encontrar ressonâncias da rede são os valores mínimo e máximo considerados em torno de f_h . Veremos a seguir que para o polígono de n lados, é considerado $f_h - 0.5f_0$ e $f_h + 0.5f_0$ com passo $\Delta f_h = 6$ Hz, sendo f_0 a frequência fundamental (60 Hz). No caso do setor anular (ainda aceito nos procedimentos de rede) se considera $f_h - f_0$ e $f_h + f_0$ com passo $\Delta f_h = 60$ Hz (apenas 3 valores de admitância).

Um dos fatores que levam ao conservadorismo do MLG, alegado pelos empreendedores, é que os LGs devem retratar a variação das admitâncias harmônicas do parque (ou qualquer outro tipo de empreendimento) por toda a sua vida útil, estimada em 20 anos. No entanto, por falta de informações sobre as configurações futuras do SIN, apenas 2 anos à frente são considerados. Portanto, tenta-se compensar esta falta de informações utilizando critérios conservadores como, por exemplo, não levando em conta a probabilidade de falta de determinado equipamento e considerando um elevado número de elementos contingenciados. Outro fator é o aumento significativo de harmônicos circulando no SIN, comprovado recentemente pela saída de operação do elo de Ibiúna devido à sobrecarga dos filtros de 3° e 5° harmônicos, onde a corrente gerada pelo elo representava apenas 10% da corrente total dos filtros.

Devido aos fatos acima descritos e que, em menor ou maior grau, a segurança sistêmica do setor elétrico é responsabilidade de todos os agentes, as propostas de mudanças nos PR devem ser feitas baseadas em fortes indícios técnicos. Apesar desta responsabilidade, o aperfeiçoamento contínuo dos PR, tornando-os mais justos e realistas, deve ser objetivo de todos os agentes do setor.

Como explicado anteriormente, os resultados da aplicação dos PR fornecem apenas majorantes para as distorções harmônicas individuais e totais, cujos valores não podem ser verificados por medições. No entanto, a precisão do programa HarmZs pode ser verificada experimentalmente. Esta verificação é importante, pois mostra que os PR utilizam uma ferramenta computacional capaz de representar com aceitável precisão determinadas características das redes elétricas. Em [4] e [5] foram realizadas comparações entre medições e simulações utilizando o programa HarmZs onde pôde-se verificar boa consistência entre os valores comparados. Como exemplo destas comparações, a Figura 1, retirada de [4], cortesia da Eletrobras Eletrosul, apresenta a curva V_{xl} para o 5°

harmônico obtido em campanhas de medição na subestação de Livramento 2 230kV, que é o PAC (Ponto de Acoplamento Comum) relativo ao Complexo Eólico de Cerro Chato (propriedade da Eletrobras Eletrosul). Distante aproximadamente 50 km do parque, há a conversora de frequência de Rivera que é despachada ocasionalmente e conseqüentemente é energizada junto com seus filtros, os quais reduzem as distorções no PAC do parque.

De acordo com a BT 468 [6], se os pontos medidos se situarem próximos da reta $|Z_i|$, que representa o módulo da impedância da rede interna do consumidor vista do PAC, então as fontes dominantes de harmônicos, de ordem h , são as existentes no resto do sistema que fluem pelas instalações do consumidor devido à presença de capacitores ou filtros. Por outro lado, se as medições se concentrarem predominantemente próximas da reta $|Z_e|$, que representa a impedância do sistema, então as fontes dominantes, de ordem h , são as fontes existentes no consumidor que fluem pela impedância da rede.

Nesta Figura 1 pode-se reparar a existência de 3 regiões bem distintas na nuvem de pontos V_{xI} . Os pontos da região 1, situados em torno da reta $|Z_i|$, apresentam a condição normal de operação do parque. A região 2 também considera a operação normal do parque eólico, mas com a conversora de Rivera em operação. Os pontos na região 3 ocorrem quando a rede de média tensão do parque e os aerogeradores estão desligados, ficando energizados apenas a LT 230 kV e os transformadores 230/34,5 kV de uso exclusivo dos parques. Note que para cada situação de operação, foi realizada a simulação rede apropriada e calculada a impedância vista da barra do PAC. Os valores simulados são as 3 retas traçadas no gráfico. É fácil observar que os valores de medição tem a tendência de seguir os valores simulados.

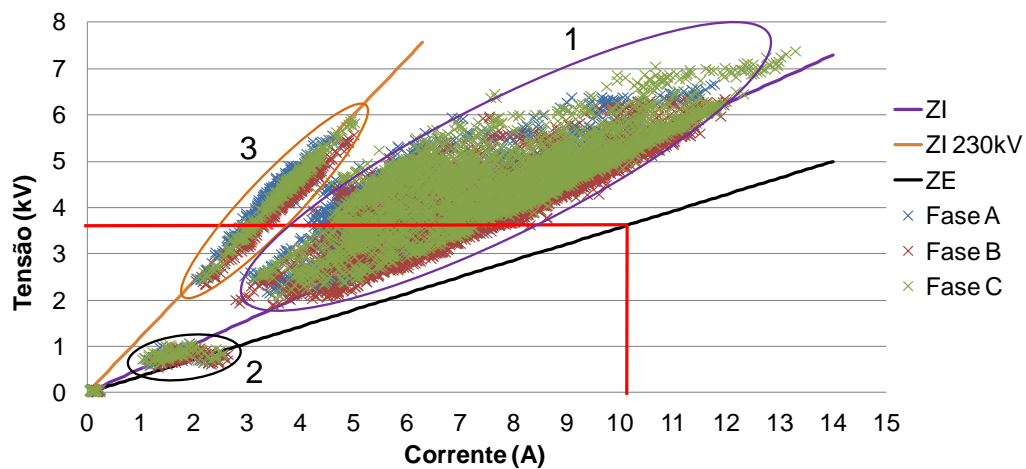


Figura 1 – Curva V_{xI} para o 5º harmônico obtidas para o PAC do Complexo Eólico de Cerro Chato

3.0 - PRINCIPAIS ALTERAÇÕES NOS PROCEDIMENTOS DE REDE QUE LEVARAM A MUDANÇAS NO PROGRAMA HarmZs

Uma das alterações mais significativas nos PR, descrita em [1] e com implicações no programa HarmZs, foi a possibilidade de representação da rede externa (Rede Básica) por polígonos de “n” lados. Esta representação, de acordo com referências mais recentes [2], [7], se mostrou uma alternativa menos conservadora e aceitável para estudos envolvendo parques eólicos, solares e consumidores livres.

Devido a algumas particularidades do polígono de n lados como, por exemplo, menor conservadorismo na representação da rede externa em relação ao setor angular (circular), o intervalo harmônico e o passo de frequência para o seu traçado foram definidos nos PR de forma distinta aos adotados para o setor angular, objetivando aumentar a margem de segurança desta representação. Desta forma, os limites inferior e superior deste intervalo foram definidos como $(f_h - 0.5f_0)$ e $(f_h + 0.5f_0)$, respectivamente. O passo de frequência adotado para o cálculo das impedâncias harmônicas foi $\pm 0,1$ de f_0 (ou $\pm 6\text{Hz}$). Esta representação é apresentada na Figura 2.

Cabe lembrar que os limites inferior e superior do intervalo harmônico e o passo de frequência adotados para o traçado dos setores circulares não sofreram alteração nos novos PR, sendo iguais a $(f_h - f_0)$, $(f_h + f_0)$ e $\pm f_0$ (ou $\pm 60\text{Hz}$), respectivamente.

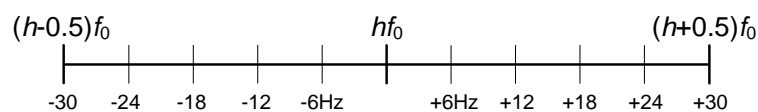


Figura 2 – Intervalo harmônico para traçados de polígonos de admitâncias de “n” lados

4.0 - TRAÇADOS DE LUGARES GEOMÉTRICOS NO PROGRAMA HarmZs

Para a representação dos LGs, sejam eles de impedâncias ou de admitâncias, várias formas geométricas podem ser utilizadas [7]. Tradicionalmente, são escolhidos setores angulares, diagramas de círculo, polígonos, áreas limitadas por retas e arcos de circunferência, etc.

No programa HarmZs, até a versão 2.0.2, era possível traçar diagramas circulares de impedâncias, setores angulares (circulares) de impedâncias e de admitâncias. Podia-se, também, visualizar a nuvem de pontos de impedâncias ou de admitâncias, sendo possível identificar os valores que definiam os limites dos diagramas.

No entanto, todas essas formas geométricas somente podiam ser traçadas utilizando uma interface gráfica onde os LGs eram criados de forma individual, um para cada frequência. Deste modo, o traçado dos LGs para todas as frequências era uma tarefa um tanto quanto trabalhosa considerando-se que, no geral, em estudos de comportamento harmônico, são traçados os LGs para 49 harmônicos (do 2° ao 50°). Essa interface gráfica desenvolvida na versão 2.0.2 do programa HarmZs, onde ainda não existia a possibilidade de traçado de polígonos, está apresentada na Figura 3.

Cabe lembrar que, embora possa se fazer a representação dos LGs no programa HarmZs por impedâncias ou admitâncias, neste trabalho o foco são os LGs de admitâncias.

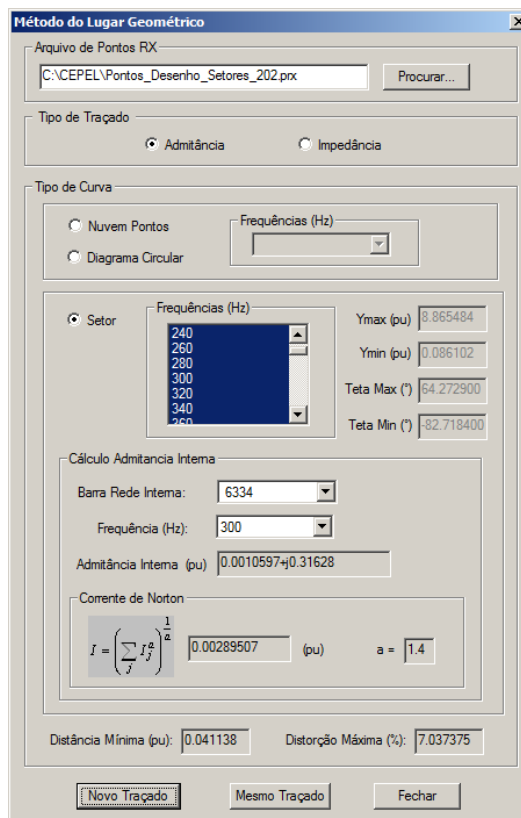


Figura 3 – Interface para traçados de LGs na versão 2.0.2 do programa HarmZs

5.0 - NOVAS IMPLEMENTAÇÕES NOS TRAÇADOS DE LUGARES GEOMÉTRICOS NO PROGRAMA HarmZs

Para que o programa HarmZs do CEPEL [3], que é indicado pelo ONS como ferramenta de execução dos estudos do comportamento harmônico de novas instalações conectadas à Rede Básica, pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos, a metodologia para determinação e traçado dos polígonos de n lados, adotada nos novos PR [1], foi implementada na versão 3.0 do programa.

A primeira etapa da implementação foi realizada atualizando o diálogo da Figura 3 existente na versão 2.0.2. Neste diálogo foi adicionada a opção de traçado de polígonos de admitâncias, dentre outras opções que serão descritas a seguir. Na Figura 4 é apresentada a interface gráfica atualizada para traçados de LGs. Note que neste diálogo os LGs ainda são traçados de forma individual.

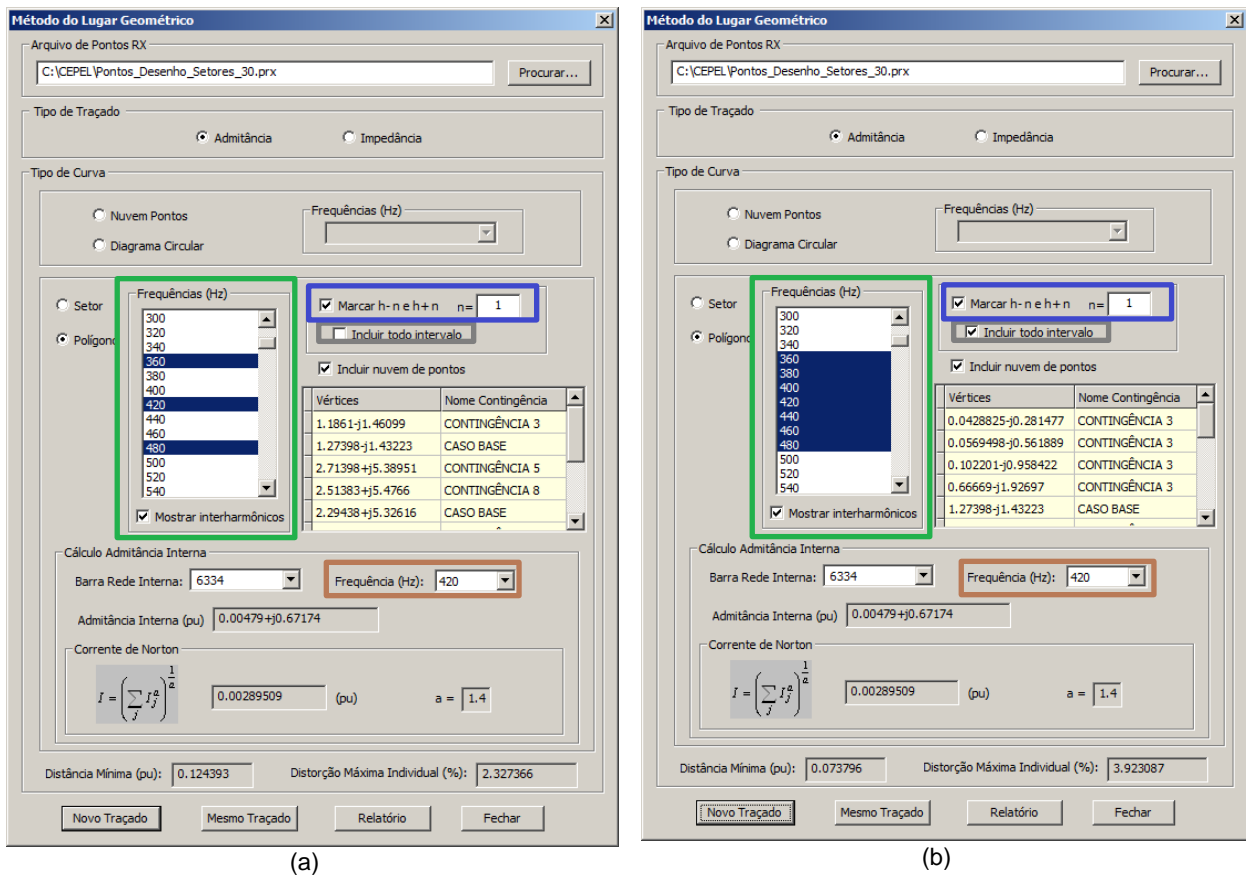


Figura 4 – Nova interface gráfica para traçados de LGs individuais no HarmZs

A seguir será apresentado o procedimento para os traçados dos LGs utilizando-se a nova interface gráfica do programa HarmZs com as implementações criadas para atender os novos PR do ONS. Nas explicações feitas a seguir, os casos utilizados são redes reais referentes a um estudo de comportamento harmônico de um novo acesso a rede básica de uma instalação que possui equipamentos não lineares que injetam harmônicos na rede. A rede interna, representando a instalação que possui conteúdo harmônico, é utilizada no cálculo da corrente de Norton e de sua impedância vista do PAC. A rede externa, que representa as diversas configurações do SIN, é utilizada para calcular as impedâncias harmônicas vistas do PAC que darão origem aos LGs de admitância na forma de setores ou polígonos. A partir destes cálculos envolvendo ambas as redes (interna e externa) são determinadas as máximas distorções harmônicas individuais e total.

A escolha da frequência do LG é feita através da *combobox* “Frequência (Hz)” destacada na cor marrom na Figura 4. Após esta escolha, a frequência selecionada é marcada automaticamente no *frame* “Frequências (Hz)”, destacado na cor verde. As frequências marcadas neste *frame* são as que realmente darão forma ao LG.

Como solicitado pelo ONS nos seus novos PR, é necessária a escolha de um intervalo harmônico para o traçado de setores angulares e de polígonos. Para que os limites deste intervalo sejam escolhidos automaticamente, foi implementada a opção “Marcar h-n e h+n”, evidenciada em tom azul. Note que h representa a ordem da frequência harmônica $f_h = hf_0$ e n o fator multiplicador da ordem da frequência fundamental f_0 (que é igual a 1). Logo $(h - n)$ e $(h + n)$ são equivalentes a $(f_h - nf_0)$ e $(f_h + nf_0)$ ou a $(h - n)f_0$ e $(h + n)f_0$, respectivamente. Conforme mostrado na Figura 4, é necessário informar o valor do “n”. Dois exemplos de escolha deste valor são informados na Tabela 1. Observa-se que ao ser selecionada esta opção, somente as frequências dos limites inferior $(h - n)f_0$ e superior $(h + n)f_0$, além da frequência hf_0 , são escolhidas no *frame* “Frequências (Hz)”.

Outra funcionalidade implementada é a opção “Incluir todo intervalo” (destacada na cor cinza) para que todas as frequências existentes entre esses limites sejam selecionadas. Note que, na Figura 4 (a) a opção “Incluir todo intervalo” está desmarcada e somente as frequências 360, 420 e 480 Hz estão selecionadas. Já na Figura 4 (b), a mesma opção está marcada e todo o intervalo, de 360 a 480 Hz, é selecionado.

Cabe lembrar que as frequências apresentadas no *frame* “Frequências (Hz)”, destacado na cor verde, estão de acordo com o passo escolhido no cálculo das impedâncias harmônicas que é feito com a utilização da ferramenta batch [8]. Após a execução dessa ferramenta batch, um arquivo de extensão PRX com os valores das frequências e respectivas impedâncias é criado. Este arquivo PRX é carregado nesta interface gráfica e, a partir da leitura deste arquivo, as frequências harmônicas possíveis são apresentadas na interface gráfica.

De acordo com os novos PR, para o caso do LG escolhido ser o polígono de n lados, o passo de cálculo das impedâncias no batch deve ser de $\pm 0,1$ de f_0 (ou ± 6 Hz). No entanto, como este passo geraria muitas frequências, para que fosse possível visualizar com maior facilidade as seleções nas interfaces gráficas apresentadas neste trabalho, foi escolhido o passo de 20 Hz.

Tabela 1: Valores de $h-n$ e $h+n$ para diferentes valores de n

n	nf_0 (Hz)	$f_h - nf_0$ (Hz)	hf_0 (Hz)	$f_h + nf_0$ (Hz)
0.5 (padrão)	30	390	420	450
1.0 (exemplo)	60	360	420	480

Note que, para o caso do traçado de polígonos, a opção “*Marcar $h-n$ e $h+n$* ” deve estar selecionada e o valor do n deve ser igual a 0.5. Como deve ser considerado todo o intervalo entre $h-n$ e $h+n$, a opção “*Incluir todo intervalo*” também deverá ser selecionada.

Para o caso de traçado de setores angulares, a opção “*Marcar $h-n$ e $h+n$* ” deve estar selecionada com o valor do n igual a 1. Como só devem ser consideradas as frequências limites e não todo intervalo, a opção “*Incluir todo intervalo*” não deve ser selecionada.

É importante observar que no momento de se calcular as impedâncias utilizando a ferramenta batch, deve ser utilizado o passo de frequências igual a 6 Hz, que é o passo necessário para representar os LGs por polígonos de admitâncias. No entanto, os valores de impedâncias calculados com esse mesmo passo podem ser utilizados para a representação por setores angulares, pois somente as frequências limites $h-1$ e $h+1$ serão selecionadas com a não ativação da opção “*Incluir todo intervalo*”.

Como uma segunda etapa, foi desenvolvida uma nova interface gráfica extremamente amigável e flexível, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos novos PR. Esta interface está apresentada na Figura 5. Observa-se que é possível escolher opções diferentes para setores e polígonos (valor do n na forma $h \pm n$, e inclusão ou não de todo intervalo). Desta forma, o usuário poderá optar pelo LG que lhe for mais conveniente em relação à necessidade de se adotar medidas mitigadoras como a utilização de filtros passivos, sem praticamente nenhum esforço adicional. Por meio desta interface, é possível realizar traçados de LGs de todas as frequências desejadas de uma só vez e de forma bastante automatizada. As grandezas que definem os LGs (módulos e ângulos de admitâncias mínimos e máximos para os setores angulares, e vértices de admitâncias para os polígonos de n lados), bem como as contingências que as geraram, são também apresentadas na interface.

Distorção Máxima Total - LG

Rede Interna: Barra Rede Interna: 6334

Arquivo de Pontos RX: C:\CEPEL\Pontos_Desenho_Setores_30.prx

Tipo de Lugar Geométrico:

- Setor
 - Marcar $h-n$ e $h+n$ $n = 1$
 - Incluir todo intervalo
- Polígono
 - Marcar $h-n$ e $h+n$ $n = 0.5$
 - Incluir todo intervalo
- Incluir nuvem de pontos
- Sobrepor Traçados

Cálculo

DHT Máxima (%): Setor: 58.81926236502 Polígono: 12.918517364090

Freq(Hz)	I Norton(pu)	a	Y(pu)	Ymin Setor(pu)	Ymin Polig(pu)	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)
120	0.00459522	1.0	0.00010+j0.09745	0.0146866403752626	0.220019480785273	31.2884198995627	2.08855038
180	0.00919044	1.0	0.00025+j0.15463	0.0198501571255712	0.0877173300013722	46.299060264075	10.477332
240	0.00459522	1.0	0.00053+j0.22435	0.0289640868340874	0.0976769394385293	15.8652288549374	4.7045072
300	0.00289507	1.4	0.00106+j0.31628	0.0411384558157956	0.0790379919010671	7.03737475376115	3.6628806
360	0.00144754	1.4	0.00215+j0.44980	0.0474910247691524	0.217013575961775	3.04802297748455	0.6670261
420	0.00289509	1.4	0.00479+j0.67174	0.0725016835651324	0.0737961315106263	3.99313026139116	3.9230873
480	0.00144755	1.4	0.01367+j1.13422	0.127975950218718	1.08838576089772	1.13111286885816	0.1329999
540	0.00289513	1.4	0.08229+j2.77955	1.10816551412237	1.13827466814525	0.261254412450488	0.2543438
600	0.00144758	1.4	0.99149-j9.59354	1.93540959647476	4.71881023053214	0.074794715109968	0.0306768
660	0.00121747	2.0	0.03910-j1.91318	0.3519540008392	0.730438214874824	0.34591597798536	0.1666759
720	0.00060877	2.0	0.01294-j1.09951	0.192861732337399	0.216298079234643	0.315649317508044	0.2814480
780	0.00121762	2.0	0.00663-j0.78652	0.236051077658097	0.489148430326504	0.515829877090926	0.2489268
840	0.00060887	2.0	0.00413-j0.61967	0.347862599291049	1.33897298802571	0.175030961411205	0.0454727
900	0.00121788	2.0	0.00286-j0.51534	0.301155183939652	0.919740406715085	0.404401266425387	0.1324151

Limites

Setor Polígono

Vértices	Nome Contingência
0.0569498-j0.561889	CONTINGÊNCIA 3
0.102201-j0.958422	CONTINGÊNCIA 3
0.190623-j0.562639	CASO BASE
0.487965+j2.26958	CONTINGÊNCIA 5
0.477804+j2.26112	CONTINGÊNCIA 8
0.460631+j2.22177	CASO BASE
0.0631179+j0.704818	CONTINGÊNCIA 1
0.0428825-j0.281477	CONTINGÊNCIA 3

Valores Limites Exportar Excel (.csv)

Figura 5 – Traçados de múltiplos LGs no HarmZs

Outra facilidade importante desta interface é a apresentação de todos os resultados de forma tabular, destacando-se na cor vermelha todas as distorções harmônicas individuais (DHI) e totais (DHT) que ultrapassaram os limites adotados nos PR. O programa permite que estes limites sejam editados conforme modificações nos PR ou caso o usuário queira utilizar outra norma técnica. Estes limites estão apresentados na Figura 6.

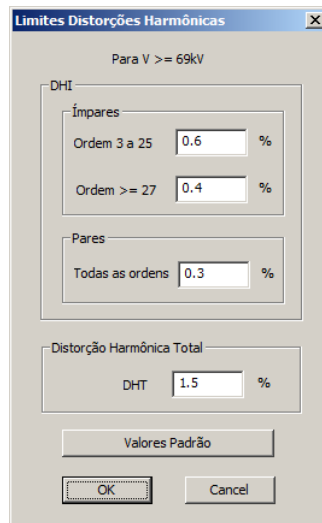


Figura 6 – Diálogo com os valores dos limites adotados para as distorções harmônicas para tensões superiores a 69kV

É também possível exportar todos os resultados obtidos para o Excel para que os usuários possam fazer comparações mais detalhadas e preparar relatórios de forma fácil e rápida. Um exemplo de exportação para o Excel é apresentado na Figura 7.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Freq(Hz)	Norton (pu)	a	Y(pu)	Ymin Setor(pu)	Ymin Polig(pu)	DHI Máx Setor(%)	DHI Máx Polig(%)	Frequências Setor	Frequências Poligono	Ymax Setor(pu)	Cont. Ymax	Ymin Setor(pu)	Cont. Ymin	Teta
120	0,0046	1	0,0001+0,0975	0,0147	0,088	31,2884	5,2194	120 180	120 180	2,466	CASO BASE	0,0907	CONTINGENCIA 6	
180	0,0092	1	0,0003+0,1546	0,0199	0,0814	46,2991	11,295	120 180 240	120 180 240	8,8655	CONTINGENCIA 2	0,0907	CONTINGENCIA 6	
240	0,0046	1	0,0005+0,2244	0,029	0,0821	15,8652	5,5962	180 240 300	180 240 300	8,8655	CONTINGENCIA 2	0,0907	CONTINGENCIA 6	
300	0,0029	1,4	0,0011+0,3163	0,0411	0,0995	7,0374	2,9108	240 300 360	240 300 360	8,8655	CONTINGENCIA 2	0,1701	CONTINGENCIA 7	
360	0,0014	1,4	0,0021+0,4498	0,0475	0,0595	3,048	2,4343	300 360 420	300 360 420	4,9461	CONTINGENCIA 6	0,1237	CONTINGENCIA 2	
420	0,0029	1,4	0,0048+0,6717	0,0725	0,1244	3,9931	2,3274	360 420 480	360 420 480	6,0343	CONTINGENCIA 5	0,1237	CONTINGENCIA 2	
480	0,0014	1,4	0,0137+1,1342	0,128	0,3318	1,1311	0,4363	420 480 540	420 480 540	6,0343	CONTINGENCIA 5	0,1237	CONTINGENCIA 2	
540	0,0029	1,4	0,0823+0,7795	1,1082	1,1761	0,2613	0,2462	480 540 600	480 540 600	6,0343	CONTINGENCIA 5	0,2137	CONTINGENCIA 3	
600	0,0014	1,4	0,9915-9,5935	1,9354	5,4881	0,0748	0,0264	540 600 660	540 600 660	14,2818	CONTINGENCIA 5	0,2789	CONTINGENCIA 6	
660	0,0012	2	0,0391-1,9132	0,352	0,3685	0,3459	0,3304	600 660 720	600 660 720	14,2818	CONTINGENCIA 5	0,2789	CONTINGENCIA 6	
720	0,0006	2	0,0129-1,0995	0,1229	0,2255	0,3156	0,27	660 720 780	660 720 780	14,2818	CONTINGENCIA 5	0,2789	CONTINGENCIA 6	
780	0,0012	2	0,0066-0,7865	0,2361	0,2398	0,5158	0,5077	720 780 840	720 780 840	8,2484	CONTINGENCIA 2	0,9682	CONTINGENCIA 4	
840	0,0006	2	0,0041-0,6197	0,3479	0,5255	0,175	0,1159	780 840 900	780 840 900	8,2484	CONTINGENCIA 2	0,8541	CONTINGENCIA 9	
900	0,0012	2	0,0029-0,5153	0,3012	0,3381	0,4044	0,3602	840 900 960	840 900 960	7,8464	CASO BASE	0,4616	CONTINGENCIA 7	
960	0,0006	2	0,0017-0,4436	0,2565	0,2766	0,2375	0,2202	900 960 1020	900 960 1020	4,9575	CASO BASE	0,096	CONTINGENCIA 1	
1020	0,0006	2	0,0017-0,3909	0,0894	0,0989	0,6815	0,616	960 1020 1080	960 1020 1080	4,9575	CASO BASE	0,096	CONTINGENCIA 1	
1080	0,0003	2	0,0013-0,3505	0,0523	0,0982	0,582	0,3101	1020 1080 1140	1020 1080 1140	4,9575	CASO BASE	0,096	CONTINGENCIA 1	
1140	0,0006	2	0,0011-0,3184	0,0464	0,1124	1,3139	0,5424	1080 1140 1200	1080 1140 1200	2,5641	CONTINGENCIA 2	0,2868	CONTINGENCIA 3	
1200	0,0003	2	0,0009-0,2923	0,0425	0,1769	0,7173	0,1723	1140 1200 1260	1140 1200 1260	7,4123	CONTINGENCIA 2	0,2868	CONTINGENCIA 3	
1260	0,0006	2	0,0008-0,2705	0,1442	0,3682	0,4228	0,1656	1200 1260 1320	1200 1260 1320	15,444	CASO BASE	0,4064	CONTINGENCIA 4	
1320	0,0003	2	0,0007-0,2520	0,5772	0,0528	0,0528	0,106	1260 1320 1380	1260 1320 1380	16,1356	CONTINGENCIA 8	0,8213	CONTINGENCIA 3	
1380	0,0006	2	0,0006-0,2361	0,0628	0,2383	0,9715	0,2562	1320 1380 1440	1320 1380 1440	16,1356	CONTINGENCIA 8	0,1916	CONTINGENCIA 3	
1440	0,0003	2	0,0005-0,2222	0,0803	0,2182	0,3802	0,14	1380 1440 1500	1380 1440 1500	16,1356	CONTINGENCIA 8	0,1916	CONTINGENCIA 3	
1500	0,0006	2	0,0005-0,2100	0,0759	0,2166	0,8052	0,2821	1440 1500 1560	1440 1500 1560	3,7946	CASO BASE	0,1916	CONTINGENCIA 3	
1560	0,0003	2	0,0004-0,1992	0,3594	0,2376	0,0851	0,1287	1500 1560 1620	1500 1560 1620	4,8215	CASO BASE	0,5379	CONTINGENCIA 1	
1620	0,0006	2	0,0004-0,1896	0,0885	0,215	0,6914	0,2848	1560 1620 1680	1560 1620 1680	4,8215	CASO BASE	0,1883	CONTINGENCIA 4	
1680	0,0003	2	0,0004-0,1809	0,0758	0,1281	0,4042	0,2392	1620 1680 1740	1620 1680 1740	4,8215	CASO BASE	0,1883	CONTINGENCIA 4	
1740	0,0006	2	0,0003-0,1730	0,0412	0,128	1,489	0,4791	1680 1740 1800	1680 1740 1800	6,2966	CASO BASE	0,1883	CONTINGENCIA 4	
1800	0,0003	2	0,0003-0,1658	0,1525	0,1564	0,2013	0,1963	1740 1800 1860	1740 1800 1860	6,2966	CASO BASE	0,3117	CONTINGENCIA 7	
1860	0,0006	2	0,0003-0,1593	0,1948	0,2306	0,3157	0,2668	1800 1860 1920	1800 1860 1920	6,2966	CASO BASE	0,3485	CONTINGENCIA 3	
1920	0,0003	2	0,0003-0,1532	0,2005	0,2315	0,1537	0,1331	1860 1920 1980	1860 1920 1980	6,9258	CONTINGENCIA 7	0,3485	CONTINGENCIA 3	
1980	0,0006	2	0,0003-0,1477	0,2064	0,288	0,2991	0,2144	1920 1980 2040	1920 1980 2040	11,3816	CASO BASE	0,3485	CONTINGENCIA 3	
2040	0,0003	2	0,0002-0,1425	0,4877	0,3979	0,0634	0,0777	1980 2040 2100	1980 2040 2100	11,3816	CASO BASE	0,6744	CONTINGENCIA 6	

Figura 7 – Tabela Excel contendo os dados de traçados de múltiplos LGs no HarmZs

Além de realizar os cálculos das DHIs e DHTs máximas, considerando setores e/ou polígonos, a ferramenta também traça os LGs para todas as frequências automaticamente.

Se o usuário escolher os traçados de setores e polígonos e selecionar a opção “Sobrepor Traçados”, as duas formas geométricas serão apresentadas em um mesmo gráfico. Esses traçados sobrepostos podem ser visualizados na Figura 8. Se a opção de sobrepor traçados não for marcada, o programa irá traçar os setores e os polígonos em gráficos diferentes, considerando todas as frequências do estudo.

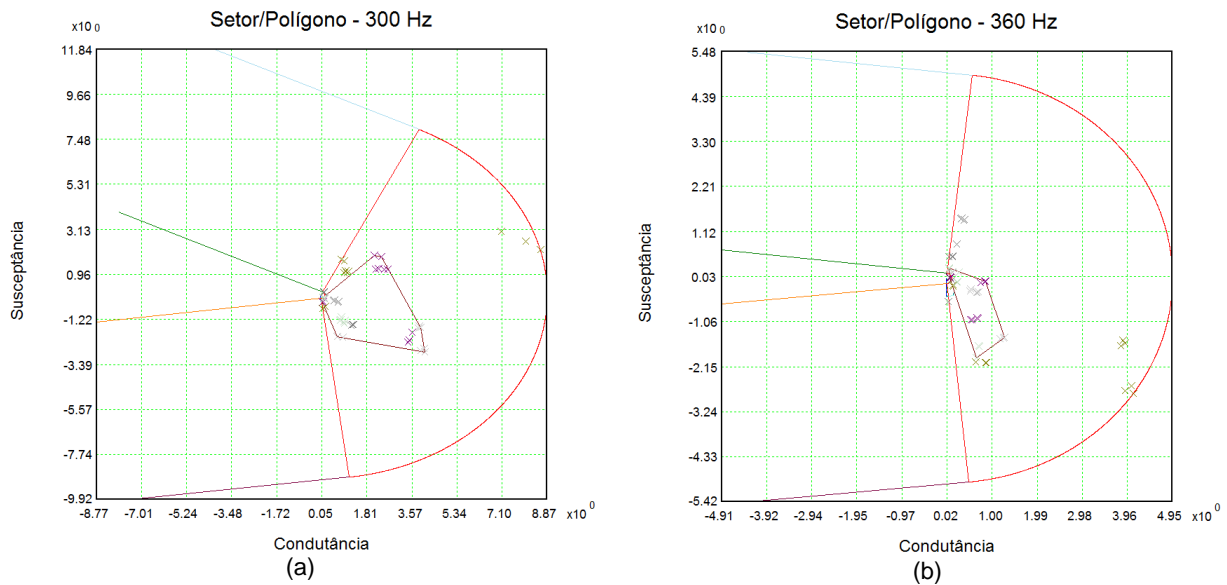


Figura 8 – Traçado sobreposto do polígono e do setor angular para as frequências de 300 e 360 Hz

6.0 - CONCLUSÃO

O ONS atualizou os PR através da emissão de uma nota técnica [1] com o intuito de atender às necessidades de melhoria do processo de gerenciamento da emissão de harmônicos. Esse novo documento procura flexibilizar os PR de forma a atender às constantes reivindicações dos agentes no sentido de tornar a forma de avaliação dos estudos de desempenho harmônico menos conservadora e mais alinhada às normas internacionais de grande relevância técnica.

Destaca-se, dentre as modificações, a possibilidade de se utilizar nos estudos de acesso de novas instalações à Rede Básica, além dos setores angulares, polígonos de n lados para a representação dos Lugares Geométricos (LGs) de admitâncias do Sistema Interligado Nacional (SIN). Os intervalos harmônicos e os passos de frequência adotados neste novo documento para a determinação e traçado de cada tipo de LG (setor angular ou polígono de n lados), necessários para o cálculo das máximas distorções harmônicas de tensão, são diferentes entre si.

Deste modo, para que o programa HarmZs pudesse continuar atendendo plenamente as necessidades dos agentes na realização destes estudos, a metodologia para determinação e traçado destes polígonos foi implementada na versão 3.0 do programa. Uma interface gráfica extremamente amigável e flexível foi desenvolvida, onde é possível a realização dos estudos considerando simultaneamente LGs de setores angulares e de polígonos de n lados, determinados e traçados de acordo com as particularidades de cada um descritas nos novos PR. Além da visualização dos traçados gráficos dos setores e polígonos, os resultados do estudo são também apresentados no formato de tabelas que podem ser exportadas para o Excel, permitindo que o usuário possa manipular os dados e preparar facilmente relatórios bastante completos.

A flexibilidade da ferramenta, sua facilidade de utilização e velocidade de processamento tornam possíveis análises de sensibilidades mais rigorosas e detalhadas em relação a parâmetros como intervalo harmônico e passo de frequência, utilizados na construção dos LGs. Assim, os usuários e o próprio ONS podem utilizar o programa como ferramenta de aprimoramento dos PR atuais, uma vez que estes tendem a ser dinâmicos de acordo com a evolução do sistema.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres - REV.01 - ONS – Operador Nacional do Sistema – www.ons.org.br, abril de 2016.
- [2] Franklin Clement Véliz, Sergio Luis Varricchio e Cristiano de Oliveira Costa, “Metodologia para a Representação de Redes Elétricas por Polígonos de Admitâncias para Estudos de Impacto Harmônico”, XXII SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília (DF), 12 a 16 de outubro de 2013.
- [3] 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.
- [4] Miguel Pires de Carli, Breno Torres Meyer, Ricardo Penido D. Ross, Alex Jean de Castro Mello, “Harmônicos Resultantes da Conexão de Parques Eólicos com a Rede Elétrica: Análise Conjunta de

Medições e Simulações Associadas a um Estudo de Caso”, XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu (PR), 18 a 21 de outubro de 2015.

- [5] Sergio Luis Varricchio, Franklin Clement Véliz, Cristiano de Oliveira Costa e José Roberto Medeiros, “Distribuição de Correntes de 5º Harmônico nas Vizinhanças da SE Ibiúna 345 kV: Comparação entre Simulação e Medição”, XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis (SC), 23 a 26 de outubro de 2011.
- [6] Technical Brochure 468, “Review of Disturbances Emission Assessment Techniques”, Cigré-Cired Working Group C4-109, June 2011.
- [7] Guide to the Specification and Design Evaluation of A. C. Filters for HVDC Systems, 1st ed., IEC PAS 62001, 2009.
- [8] Cristiano de Oliveira Costa, Sergio Luis Varricchio e Franklin Clement Véliz, “Automatização Computacional de Estudos de Comportamento Harmônico”, XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém (PA), Brasil, 17 a 20 de março de 2009.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Cristiano de Oliveira Costa: Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2002. Em 2013 obteve o seu mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico de sistemas elétricos de potência. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.

Sergio Luis Varricchio: Possui graduação (1987), mestrado (1994) e doutorado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade de Brasília (UnB), respectivamente. De 1987 a 1989 trabalhou na consultora Fluxo Engenharia, desenvolvendo programas computacionais e sistemas de aterramento para subestações. De 1988 a 1989 e de 1998 a 1999 foi docente em Teoria Eletromagnética na UCP. Desde 1989 trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) como pesquisador e gerente de projetos, tendo sido o idealizador do programa computacional HarmZs para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas, largamente utilizado no setor elétrico brasileiro. Suas áreas de interesse incluem qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos e redução da ordem de modelos. É Senior Member do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e Membro do CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems). De 2008 a 2009 foi presidente do Capítulo de Potência do IEEE Power & Energy, Seção Rio de Janeiro. Recebeu Menção Honrosa do Prêmio Capes de Tese 2016 da área de ENGENHARIAS IV e o Prêmio UnB de Dissertação e Tese 2016.

Franklin Clement Véliz: Possui graduação (2001) e mestrado (2005) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico de sistemas elétricos de potência. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.

Fabiano Andrade de Oliveira: Engenheiro Eletricista formado pela Universidade Federal de Uberlândia - MG com pós-graduação em Qualidade de Energia e com ênfase em flutuação de tensão. Trabalhou na empresa ABB se envolvendo na elaboração de propostas técnicas e comerciais para Soluções Inovadoras referentes à Qualidade de Energia e Compensação de Energia Reativa (Bancos de Capacitores & Filtros de Correntes Harmônicas). Atuou ativamente na ABB como Engenheiro Líder e Especialista em equipamentos do tipo FACTS (“Flexible Alternated Current Transmission System”) voltado para “SVC” (Compensadores Estáticos) e “SC” (Bancos Série). Atualmente trabalha no ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) como Engenheiro Especialista em Energias Renováveis voltado para a Qualidade de Energia visando a Melhoria do Processo e Gerenciamento de Harmônicos na Rede Básica. Tem a responsabilidade e coordenação do Submódulo 2.8 e apoio técnico aos submódulos correlacionados dos Procedimentos de Rede.