



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

GCQ 06
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII - GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - GCQ**

**DETERMINAÇÃO DAS CARGAS LINEARES CRÍTICAS PARA ESTUDOS DE COMPORTAMENTO
HARMÔNICO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**

Sergio Luis Varricchio* Franklin Clement Véliz Cristiano de Oliveira Costa Ricardo Penido D. Ross

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

José Roberto de Medeiros

JRMED Engenharia

RESUMO

Este artigo traz uma contribuição na determinação de impedância, distorção e fluxo harmônico através de modelagem digital. Este tipo de ferramenta tem sido alvo de críticas devido as dificuldades associadas a simulação apropriada das cargas. A metodologia apresentada permite discernir, para um determinado estudo, quais são os barramentos, dentro de um conjunto enorme, que devem ter as suas cargas elétricas modeladas de forma precisa e detalhada e quais os barramentos cuja modelagem das cargas é pouco relevante para os objetivos do estudo.

PALAVRAS-CHAVE

Cargas lineares, Modelagem de Cargas, Sistemas de Potência, Harmônicos, Resposta em Freqüência.

1.0 – INTRODUÇÃO

O termo carga linear descreve uma classe de cargas que, se alimentadas por uma fonte de tensão senoidal de freqüência f , produz somente corrente senoidal de mesma freqüência que a fonte de alimentação [1]. As cargas lineares são uma componente importante das impedâncias harmônicas do sistema, pois influenciam de forma significativa seus módulos e podem afetar também as freqüências de ressonância série e paralela [2]. O estabelecimento de modelos precisos baseados em análise teórica, tendo como informação apenas os valores de potência ativa e reativa de freqüência fundamental das cargas, é uma tarefa difícil e, por este motivo, modelos mais simples como circuitos RLC série, paralelo ou misto são comumente adotados. Este procedimento pode levar a erros nos estudos de comportamento harmônico de sistemas elétricos de potência. Na FIGURA 1 está mostrada as curvas de resposta em freqüência do módulo da impedância própria da barra Bandeira-088 de 88 kV, considerando as cargas do SIN modeladas por circuito RLC série, paralelo e misto. Como se pode observar, o módulo da impedância é bastante sensível ao modelo adotado para as cargas. Portanto, uma modelagem mais realista e detalhada das cargas do sistema é de grande importância. Julga-se que esta modelagem pode ser feita, por exemplo, por meio de medições ou de levantamento de campo de suas composições. No entanto, este procedimento é praticamente inviável para todas as cargas do sistema.

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma metodologia que determina, definido um conjunto de barras de interesse onde os estudos de comportamento harmônico devem ser realizados, quais são as barras críticas do sistema, isto é, as que devem ter suas cargas modeladas de forma precisa e detalhada e quais as barras cujas modelagens não são relevantes, pois não modificam significativamente as impedâncias próprias das barras de interesse e de transferência entre elas.

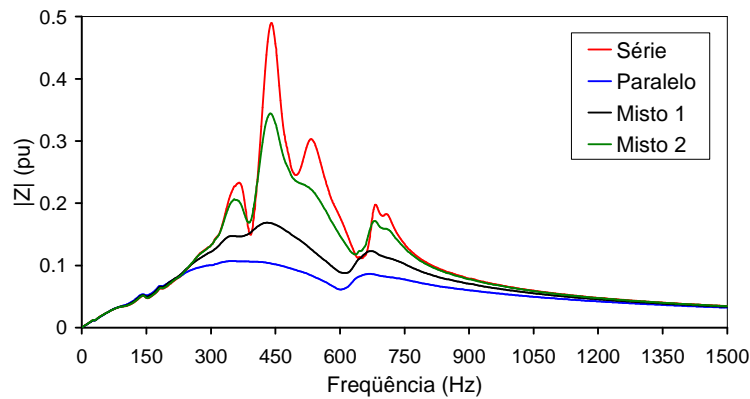


FIGURA 1: Módulo da impedância própria da barra Bandeira-088 de 88 kV, considerando as cargas do SIN modeladas por circuito *RLC* série, paralelo e misto. Na legenda Misto 1 e Misto 2 denotam que 50% e 90% dos valores das potências ativa e reativa das cargas do SIN foram modeladas como circuitos *RLC* série e o restante como *RLC* paralelo.

A metodologia proposta é verificada através de exemplo considerando todo o sistema interligado nacional (SIN) para o ano de 2005 com carregamento pesado, no qual foram selecionadas duas barras de interesse para o cálculo de suas impedâncias próprias e de transferência entre elas. É importante ressaltar que, embora no exemplo apresentado tenham sido escolhidas apenas duas barras de interesse, a metodologia proposta pode ser aplicada a um conjunto maior.

2.0 - DADOS E FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADOS

Os cálculos das impedâncias harmônicas foram realizados com o programa HarmZs [3] do CEPEL. A montagem do arquivo de entrada deste programa foi feita utilizando dados de arquivos de fluxo de potência no formato ANAREDE [4] (linhas de transmissão, banco de capacitores e indutores, transformadores, cargas, etc.) e dados de arquivos de estabilidade transitória no formato ANATEM [5] (resistência de armadura e reatância subtransitória), da base de dados do ONS de dezembro de 2005, bem como um arquivo de dados complementares de filtros harmônicos, conforme mostrado esquematicamente na FIGURA 2.

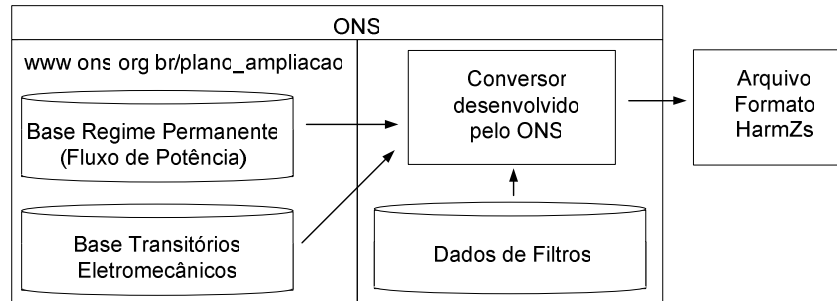


FIGURA 2: Montagem do arquivo de entrada do programa HarmZs

3.0 - BARRAS DE INTERESSE

As barras de interesse consideradas neste trabalho são BAIXADA---345 (número 471) e CABREUVA-230 (número 590). O estudo de comportamento harmônico a ser realizado nestas barras consiste no cálculo de suas impedâncias próprias e de transferência entre elas. Na FIGURA 3 está mostrada uma área do SIN que inclui estas barras de interesse.

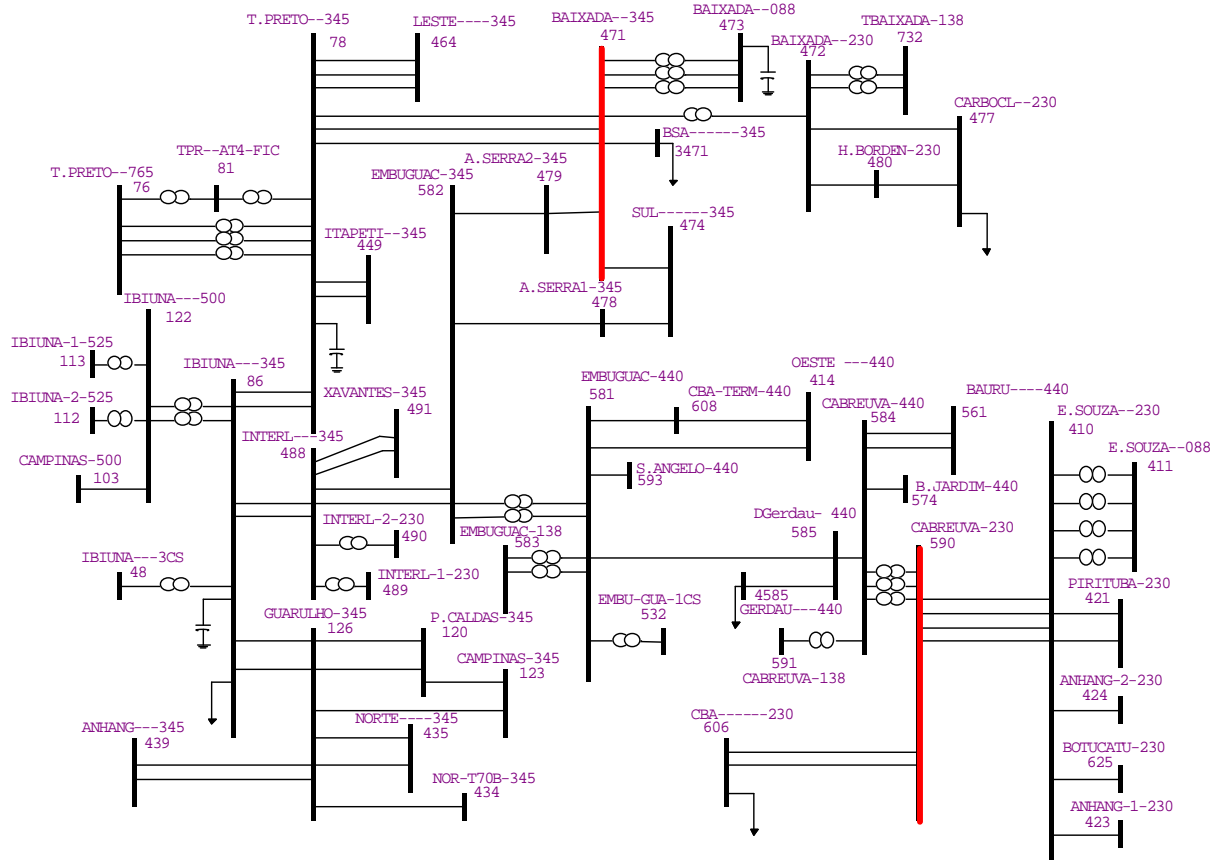


FIGURA 3 – Área do SIN incluindo as barras de interesse

4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta determina a influência de uma carga segundo o procedimento descrito a seguir:

1. Todas as cargas do sistema são retiradas (modeladas por circuitos abertos) e a curva de resposta em frequência da impedância própria da barra de interesse é traçada.
2. A carga S_k , que se deseja determinar sua influência, é modelada por um curto-circuito (as demais cargas do sistema continuam a serem modeladas por circuitos abertos) e a curva de resposta em frequência da impedância própria da barra de interesse é traçada. Quanto maiores as diferenças entre esta curva e a obtida no passo 1, maior a influência da carga S_k .

O principal motivo de se retirar todas as cargas do sistema é o de se isolar o efeito da carga S_k . Por outro lado, a modelagem por um curto-circuito da carga S_k , ao invés de se utilizar, por exemplo, um circuito RLC série (modelagem série) ou paralelo (modelagem paralela), é justificada a seguir.

Na FIGURA 4 está mostrada a curva de resposta em frequência do módulo da impedância própria da barra de interesse de um sistema hipotético com a carga S_k desconnectada do mesmo (curva azul). Também, nesta figura, estão mostradas as curvas de resposta em frequência do módulo da impedância da carga S_k para três situações distintas: comportamento real da carga supostamente conhecido (curva vermelha), modelagem série (curva preta) e modelagem paralela (curva verde). Observando estas curvas, verifica-se que os valores do módulo da impedância da carga nas modelagens série e paralela são muito maiores do que os valores do módulo da impedância própria da barra de interesse, ou seja, baseando-se nestas modelagens, se poderia concluir que a carga S_k teria uma baixa influência na impedância própria da barra de interesse em toda faixa de frequências considerada (nesta afirmação se considerou que o módulo da impedância que conecta a barra de interesse à barra k , onde a carga S_k está conectada, é muito menor do que a impedância própria da barra de interesse). Ou seja, as curvas de resposta em frequência da impedância própria da barra de interesse, traçadas com e sem a presença da carga S_k seriam praticamente iguais. No entanto, como a impedância real da carga S_k apresenta ressonâncias série (como mostrada na curva vermelha), em frequências próximas da primeira ressonância, o módulo da impedância da carga S_k é da mesma ordem de grandeza do módulo da impedância própria da barra de interesse, conforme pode ser melhor visualizado na ampliação mostrada na FIGURA 5. Assim, pelo menos neste pequeno intervalo de frequências (que em uma situação real poderia ser bem mais extenso que neste caso

hipotético) a carga S_k tem uma grande influência na resposta em frequência do módulo da impedância própria da barra de interesse. Além disso, nas frequências próximas à da primeira ressonância, o comportamento da carga S_k se aproxima mais ao de um curto-circuito do que das modelagens série ou paralela. Portanto, a modelagem da carga S_k por um curto-circuito, para toda a faixa de frequência de interesse, é o procedimento mais conservativo para a verificação da influência desta carga.

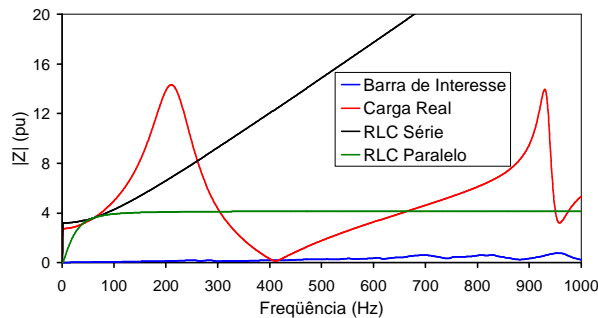


FIGURA 4: Curvas de módulo das impedâncias do sistema e da carga

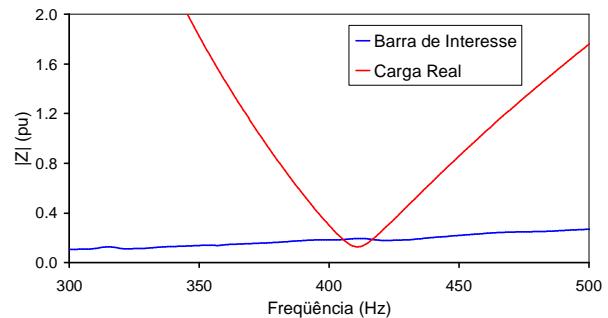


FIGURA 5: Ampliação da visualização das curvas de módulo das impedâncias

Uma propriedade importante que se verificou durante o desenvolvimento desta metodologia é descrita a seguir.

Supondo que um conjunto Ω_k de cargas de grande influência (críticas) tenha sido determinado considerando a resposta em frequência da impedância própria z_{kk} (módulo e ângulo) da barra k e que um outro conjunto Ω_j tenha sido determinado considerando a resposta em frequência da impedância própria z_{jj} (módulo e ângulo) da barra j , então o conjunto de cargas críticas para a resposta em frequência da impedância de transferência z_{kj} entre as barras k e j será o conjunto dado por $\Omega_k \cup \Omega_j$.

5.0 - EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE UMA CARGA (BARRA)

Na FIGURA 6 estão mostradas duas curvas de resposta em frequência do módulo da impedância própria da barra de interesse 590 (Cabreuva 230 kV). A curva vermelha foi traçada considerando todas as cargas do SIN modelada por circuitos abertos (sistema descarregado). A outra curva foi traçada mantendo a modelagem de circuitos abertos para as cargas do SIN com exceção da carga conectada à barra 4585 que foi modelada por um curto-circuito. Esta é a carga (barra) a qual se deseja determinar a influência para a impedância própria da barra 590. Como as curvas apresentam diferenças significativas em diversos intervalos de frequência, conclui-se que esta é uma carga (barra) crítica para esta barra de interesse.

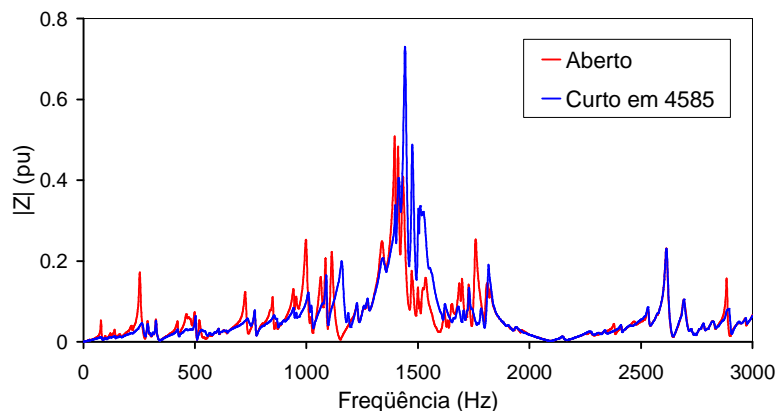


FIGURA 6: Influência da carga da barra 4585 no módulo da impedância própria da barra 590

6.0 - CONJUNTOS DE CARGAS CRÍTICAS PARA AS BARRAS DE INTERESSE

Aplicando a metodologia proposta, obtém-se os conjuntos de cargas críticas para as barras de interesse 590 e 471. Estes conjuntos são formados pelas cargas apresentadas na TABELA 1 e na TABELA 2.

TABELA 1: Cargas críticas para a barra 590

Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)
606	154.0	65.6	3150	29.5	6.0	3819	13.7	5.4	3135	22.3	6.4
607	209.0	53.7	3456	310.1	18.5	3823	15.0	13.0	3136	13.0	4.6
3411	484.3	134.2	3801	9.1	1.4	3827	26.7	2.7	3137	38.6	9.7
3422	468.2	153.1	3804	12.4	1.8	3832	9.9	1.3	3818	17.8	1.5
3428	136.9	17.6	3805	7.7	1.8	3833	3.4	1.1	3814	21.4	1.3
3429	124.2	50.8	3807	3.3	0.3	3834	20.5	7.1	3815	35.5	15.3
3493	841.7	265.6	3810	23.8	2.2	3850	28.6	1.9	3816	57.1	14.3
3494	113.7	54.9	3812	26.3	2.3	3130	33.4	9.8	3817	12.4	1.6
3496	739.2	218.0	3813	7.8	0.1	3131	11.1	4.5	-	-	-
3415	620.3	88.4	4585	16.0	5.3						

TABELA 2: Cargas críticas para a barra 471

Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)	Barra	P (MW)	Q (MVar)
400	0.5	0.0	3084	3.5	1.4	3841	19.0	1.5	3855	36.9	7.0
401	0.5	0.0	3087	23.9	7.9	3842	41.4	4.6	3857	15.7	3.5
477	106.0	21.5	3417	24.7	8.1	3844	20.8	0.0	3858	9.7	0.1
606	154.0	65.6	3465	738.8	114.6	3845	23.8	2.6	3860	20.0	6.4
607	209.0	53.7	3467	467.8	87.4	3846	11.0	5.5	3862	13.5	5.7
3045	28.7	9.4	3471	200.0	53.5	3847	25.8	1.6	3863	6.7	0.1
3046	9.7	3.4	3473	58.9	7.0	3849	11.2	1.4	3864	0.1	0.0
3054	12.2	6.2	3474	48.0	15.8	3850	28.6	1.9	3866	40.9	0.5
3066	12.3	3.0	3475	464.5	92.6	3851	39.4	4.4	3867	15.1	0.0
3069	0.2	0.1	3476	425.9	104.1	3852	28.1	1.8	3868	5.5	0.5
3072	2.8	1.3	3477	20.5	6.7	3853	46.9	13.9	3869	5.3	1.1
3078	11.0	5.0	3481	382.1	66.9	3854	51.5	8.2	4585	16.0	5.3

7.0 - TESTES DE ROBUSTEZ DA METODOLOGIA

Para verificar a robustez da metodologia proposta, diversos testes de comparação entre curvas de resposta em frequência das impedâncias próprias das barras 590 e 471 e de transferência entre elas foram realizados. Estes testes consistiram na adoção de diversos modelos para a representação das cargas críticas e demais cargas do sistema. No entanto, devido a limitações de espaço, apenas dois dos testes realizados são apresentados.

7.1 Primeiro Teste

Para o primeiro teste, uma das curvas de resposta em frequência da impedância própria da barra 590 foi traçada modelando tanto as cargas críticas (apresentadas na TABELA 1) quanto as demais por circuitos abertos (curva vermelha). A outra curva foi traçada mantendo a modelagem por circuitos abertos para as cargas críticas e alterando a das demais cargas para curto-circuitos (curva azul). Estas curvas estão mostradas na FIGURA 7.

Realizando procedimento análogo para o traçado das curvas de impedância própria da barra 471 e de transferência entre esta barra e a 590, obtêm-se os gráficos mostrados na FIGURA 8 e FIGURA 9. Note que o conjunto de cargas críticas para a impedância própria da barra 471 é formado pelas cargas apresentadas na TABELA 2, enquanto que o conjunto de cargas críticas para a impedância de transferência entre as barras 590 e 471 é formado pela união das cargas apresentadas na TABELA 1 e na TABELA 2.

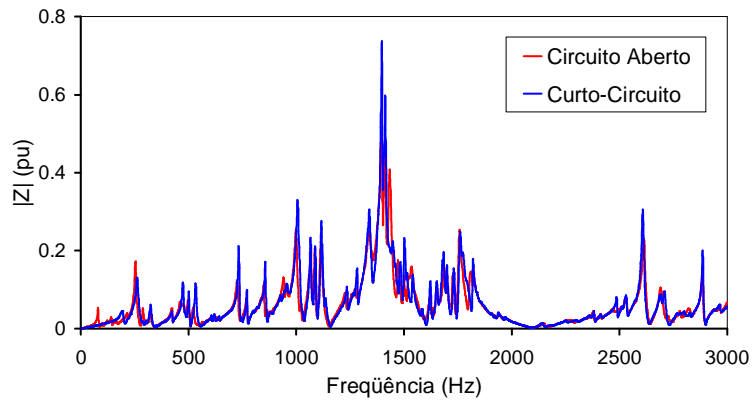


FIGURA 7: Módulo da impedância própria da barra 590. Todas as cargas do SIN modeladas por circuitos abertos (curva vermelha). Cargas críticas (TABELA 1) modeladas por circuitos abertos e demais cargas do SIN por curto-circuitos (curva azul)

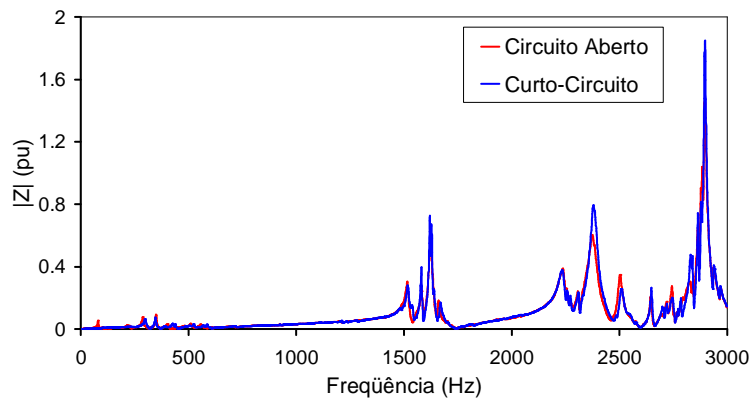


FIGURA 8: Módulo da impedância própria da barra 471. Todas as cargas do SIN modeladas por circuitos abertos (curva vermelha). Cargas críticas (TABELA 2) modeladas por circuitos abertos e demais cargas do SIN por curto-circuitos (curva azul)

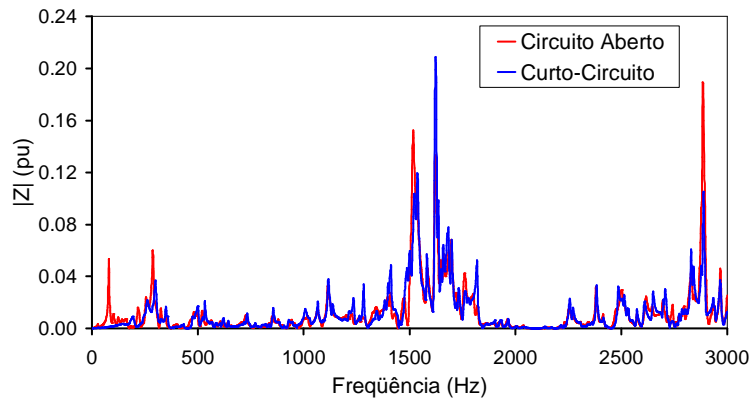


FIGURA 9: Módulo da impedância de transferência entre as barras 590 e 471. Todas as cargas do SIN modeladas por circuitos abertos (curva vermelha). Cargas críticas (TABELA 1 e TABELA 2) modeladas por circuitos abertos e demais cargas do SIN por curto-circuitos (curva azul)

Deve-se observar que, no atual estágio, os procedimentos para a determinação das cargas críticas foram feitos manualmente, exigindo um grande esforço visual e consumo de tempo. Com a automatização computacional dos procedimentos, conforme descrito no item 8.0, mais cargas críticas poderiam ser determinadas, de forma que as curvas azul e vermelha ficariam tão próximas quando se desejasse.

Como se pode observar estas curvas estão bastante próximas. Desta forma, baseando-se nos resultados deste teste, conclui-se que método proposto para a determinação das cargas críticas é válido.

7.2 Segundo Teste

O segundo teste é análogo ao primeiro, com a diferença de que as cargas críticas estão agora representadas por circuitos *RLC* paralelo. Como resultado deste teste, apenas a resposta em frequência do módulo da impedância própria da barra 590 é mostrada na FIGURA 10. As curvas de resposta em frequência da impedância própria da barra 471 e de transferência entre esta barra e a 590 apresentaram concordância similar, não sendo apresentadas por falta de espaço.

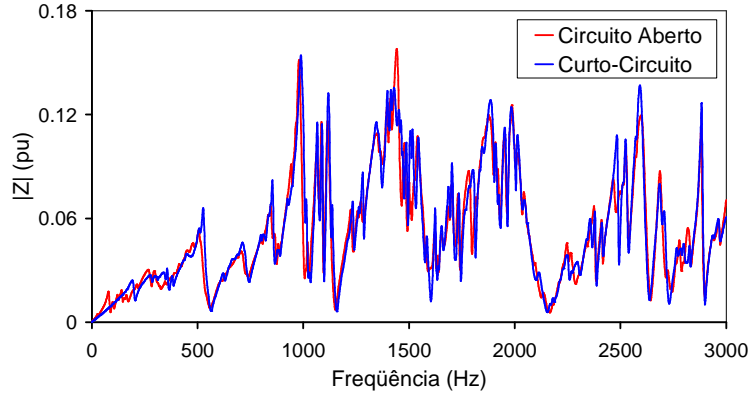


FIGURA 10: Módulo da impedância própria da barra 590. Cargas críticas (TABELA 1) modeladas por circuitos *RLC* paralelo para ambas as curvas. Demais cargas modeladas por circuitos abertos (curva vermelha) ou por curto-circuitos (curva azul)

Como se pode observar estas curvas estão bastante próximas. Desta forma, baseando-se nos resultados deste teste, conclui-se que o método proposto para a determinação das cargas críticas continua válido.

Como já mencionado, outros testes de robustez foram realizados como, por exemplo, cargas críticas modeladas por circuitos *RLC* série e as demais cargas do SIN por circuitos abertos ou por curto-circuitos. Os resultados deste outros testes foram similares aos aqui apresentados, não sendo incluídos neste trabalho por falta de espaço.

8.0 – CLASSIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA (INFLUÊNCIA) DAS CARGAS (BARRAS) CRÍTICAS

As cargas críticas podem ser classificadas segundo sua importância que pode ser medida por meio de índices. Nos trabalhos futuros, que darão prosseguimento à pesquisa descrita neste artigo, o índice que se pretende utilizar é dado por:

$$I_{icc_k} = \frac{1}{f_{final} - f_{inicial}} \int_{f_{inicial}}^{f_{final}} \left| |z_{jj}^{open}| - |z_{jj}^{curto}| \right| df \quad (1)$$

onde I_{icc_k} é o índice de importância (influência) da carga crítica S_k conectada à barra k , $f_{inicial}$ é a frequência inicial do intervalo em que se deseja calcular a influência da carga crítica, f_{final} é a frequência final do intervalo em que se deseja calcular a influência da carga crítica, $|z_{jj}^{open}|$ é módulo da impedância própria da barra j (barra de interesse) quando todas as cargas do sistema estão modeladas por circuitos abertos (sistema descarregado), $|z_{jj}^{curto}|$ é o módulo da impedância própria da barra j (barra de interesse) quando todas as cargas do sistema estão modeladas por circuitos abertos (sistema descarregado) com exceção da carga da barra k que está modelada por um curto-circuito.

Seja S_1, S_2, \dots, S_n o conjunto de cargas críticas já classificadas por sua importância. Ou seja $I_{icc_1} > I_{icc_2} > \dots > I_{icc_n}$ (a carga crítica S_1 possui mais importância do que a carga crítica S_2 e assim sucessivamente). A carga crítica S_1 deve ter seu modelo realista e detalhado determinado e incluído no sistema. Antes de se determinar o modelo detalhado da carga crítica S_2 e incluí-lo no sistema, a influência da mesma deve ser re-testada da seguinte forma. Em primeiro lugar, todas as cargas do sistema devem ser modeladas por circuitos abertos, com exceção da carga S_1 que já possui seu modelo detalhado. Com esta configuração do sistema, o módulo da impedância própria da barra de interesse $|z_{jj}^{open, S_1}|$ é calculado para toda a faixa de frequência de interesse. Em segundo lugar, a carga crítica S_2 é modelada por um curto-circuito (os demais modelos permanecem inalterados) e o módulo da impedância própria da barra de interesse $|z_{jj}^{curto, S_1}|$ é calculado

para toda a faixa de frequência de interesse. Utilizando $|Z_{jj}^{open, S_1}|$, $|Z_{jj}^{curto, S_1}|$ e (1), o novo índice de influência da carga S_2 é calculado:

$$I_{ICC_{S_2}} = \frac{1}{f_{final} - f_{inicial}} \int_{f_{inicial}}^{f_{final}} \left| |Z_{jj}^{open, S_1}| - |Z_{jj}^{curto, S_1}| \right| df \quad (2)$$

Com todas as cargas críticas classificadas, as mais importantes devem ser modeladas em detalhes em primeiro lugar. Desta forma, a medida em o modelo detalhado de uma carga crítica for incluído no sistema, a influência da carga crítica seguinte deve ser testada novamente, com o objetivo de se verificar se com a presença das cargas críticas anteriores, a mesma continua tendo influência.

Com este procedimento, de se recalculer o índice de influência das cargas críticas, é possível que número de cargas inicialmente classificadas como críticas diminua consideravelmente, evitando-se, desta forma, o gasto de recursos e de tempo para a determinação de modelos detalhados desnecessários.

9.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma metodologia, baseada em simulação digital, que determina as barras críticas, isto é, aquelas que devem ter suas cargas elétricas modeladas de forma detalhada e precisa e quais as que não têm influência significativa na resposta em frequência das impedâncias próprias das barras de interesse e de transferência entre elas.

A metodologia proposta independe do nível de carregamento do sistema, uma vez que as cargas são modeladas por circuitos abertos ou por curto-circuitos.

Como mostrado, determinando-se os conjuntos de cargas críticas para as respostas em frequência das impedâncias próprias das barras de interesse, estarão também determinados os conjuntos de cargas críticas para as impedâncias de transferência entre elas. Esta propriedade faz com que o trabalho de determinação das cargas que devem ser modeladas em detalhe seja bastante diminuído.

Um índice para medir a importância das cargas críticas é sugerido. Utilizando este índice sucessivas vezes, à medida que os modelos detalhados das cargas vão sendo incluídos no sistema, acredita-se que o número de cargas consideradas inicialmente como críticas possa ser reduzido.

Embora os procedimentos para a determinação das cargas críticas tenham sido descritos e realizados nos exemplos apresentados, os mesmos foram feitos manualmente, o que exigiu um grande esforço de análise visual e consumo de tempo. Assim, na continuação desta pesquisa, é necessário que estes procedimentos sejam automatizados. Para esta automatização, julga-se que o índice de importância ou influência das cargas críticas, definido neste trabalho, terá importância fundamental.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation, "Impact of Aggregate Linear Load Modeling on Harmonic Analysis: A comparison of Common Practice and Analytical Models", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, April 2003, pp. 625-630.
- [2] Sergio Luis Varricchio e Cristiano de Oliveira Costa "Modelagem de Cargas e de Fontes de Corrente entre Barras para Estudos de Comportamento Harmônico de Sistemas de Potência", Relatório Técnico CEPEL, No. DP/DSE-51174-05, 2005.
- [3] Sergio Luis Varricchio, Cristiano de Oliveira Costa, Leandro Ramos de Araujo, Sergio Gomes Jr., Nelson Martins e Paulo Eduardo Martins Quintão, "Manual do Usuário do Programa Harmzs Versão 1.5 para Estudo do Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas", Relatório Técnico CEPEL, No. DP-DSE-49627/04, Julho de 2005.
- [4] Edmundo Pinto Neto, Flávio Rodrigo de M. Alves, João Alberto Passos Filho e Ricardo Mota Henriques, "Programa de Análise de Redes – ANAREDE V09-08/06 - Manual do Usuário", Relatório Técnico CEPEL, No. DP-DSE 30875/2006, 2006.
- [5] Ricardo Diniz Rangel, Sergio Gomes Jr. e Julio César Rezende Ferraz, "Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – ANATEM – Manual do Usuário – V09-08/04", Relatório Técnico CEPEL, No. DP-DSE 46023/04, 2005.