

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VINICIOS BACIL

**METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADOR ENERGIZADO**

CURITIBA, 2014

VINICIOS BACIL

**METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADOR ENERGIZADO**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira

CURITIBA, 2014

B125m

Bacil, Vinícios

Metodologia para medição de resposta em frequência em transformador energizado / Vinícios Bacil. – Curitiba, 2014.

108f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

Orientador: Gustavo Henrique da Costa Oliveira .

Bibliografia: p. 106-108.

1. Transformadores elétricos. 2. Redes elétricas - Analisadores. 3. Engenharia elétrica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Oliveira, Gustavo Henrique da Costa. III. Título.

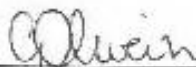
CDD: 621.314

TERMO DE APROVAÇÃO

VINÍCIOS BACIL

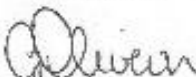
**METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE RESPOSTA EM
FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADOR ENERGIZADO**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

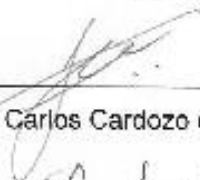


Prof. Gustavo Henrique da Costa Oliveira, Dr.
Orientador

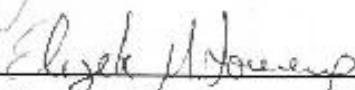
Banca Examinadora



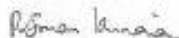
Prof. Gustavo Henrique da Costa Oliveira, Dr. (UFPR)
Presidente



Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr. (UTFPR)



Prof. Elizete Maria Lourenço, Dra. (UFPR)



Prof. Roman Kuiava, Dr. (UFPR)

CURITIBA, 19 DE AGOSTO DE 2014.

AGRADECIMENTOS

Registro meus agradecimentos a todos que de, alguma forma, contribuíram para o êxito desta dissertação, e em especial:

- ao Prof. Dr. Gustavo Henrique da Costa Oliveira pela oportunidade em tê-lo como orientador, pela confiança e companheirismo durante esta jornada;
- ao Lactec, pelo apoio, dando suporte e a estrutura necessária para que este estudo tenha sido desenvolvido;
- aos colegas e amigos do Lactec, em especial aos amigos José Arinos Teixeira Junior, Marcio Rot Sans e Marcelo Ravaglio pela ajuda e ideias construtivas para desenvolvimento do tema;
- à minha querida Danniele, pelo amor, paciência, carinho e companheirismo que nunca falham.
- aos meus pais Elio e Neide, pelo amor e paciência. Minha eterna gratidão por tudo que conquistei até aqui.

RESUMO

Os transformadores de potência são equipamentos de grande importância para o sistema elétrico. Possuem elevado custo e são fundamentais para confiabilidade do sistema, pois é por estes que passa toda a energia fornecida para os centros de carga. Muitas falhas ocorrem nesses transformadores devido a solicitações do sistema, levando o equipamento a uma redução do seu tempo de vida ou ainda a falhas diretas, culminando muitas vezes com a falta de fornecimento de energia elétrica. Diante desse cenário, diversas técnicas de diagnóstico têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Uma tendência na área de diagnóstico em transformadores são as técnicas que podem ser aplicadas em transformadores de potência energizados (conhecidas como *on-line*). Nessa dissertação, são avaliadas as técnicas de Análise de Resposta em Frequência, com atenção especial ao método de varredura de frequência, conhecido como SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*). A principal contribuição deste trabalho é a proposta de uma metodologia para aplicação do FRA *on-line* com implementação do método de varredura de frequência. Para isso utiliza-se a derivação capacitiva (*tap*) de buchas condensivas em transformadores de potência considerando vantagens, desvantagem e demais particularidade da ferramenta de diagnóstico. Finalmente são comparadas as configurações de medição de SFRA *on-line* em diferentes condições de carga do transformador. A metodologia proposta do SFRA *on-line* é aplicada em um estudo de caso de um transformador de potência de 6 MVA e 72 kV.

ABSTRACT

The power transformers are equipment of great importance for the power system. They have high cost and also are very important to the system reliability; all the energy supplied to the load centers goes through these transformers. However, many problems may occur in the transformers due to the interaction of them with the electrical system leading to a reduction in the equipment lifetime or the direct failure and often culminating with power outages. Up this background several diagnostic techniques have been developed over the past decades. Therefore, a trend in the power system is the diagnosis in transformers which are techniques that can be applied to energized power transformers (known as online techniques). In this dissertation, are evaluated techniques of Frequency Response Analysis with special attention to the frequency's sweeping method known as SFRA (Sweep Frequency Response Analysis). The main contribution of this work is to propose a methodology for application of the FRA on-line with implementation of the frequency's sweeping method. For this application we use the capacitive shunt (tap) of capacitive bushings for power transformers considering advantages, disadvantage and other particularity from the diagnostic tool. Finally the measurement settings of SFRA online are compared at different load conditions of the transformer. The proposed methodology SFRA online is applied in a case study of a 6 MVA - 72 kV power transformer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema representativo de um sistema elétrico (FONTE:“Como a ‘rede’ é hoje?”)	14
Figura 2. Exemplo de sistema de monitoramento de Descargas Parciais em transformadores (Catálogo Doble Lemke).....	17
Figura 3. Enrolamentos montados no núcleo do transformador.....	22
Figura 4. Esforço radial nos enrolamentos (PAULINO, 2009).....	24
Figura 5. Esforço axial nos enrolamentos (PAULINO, 2009)	24
Figura 6. Deslocamento de uma das bobinas do transformador (AGUIAR, 2007)	25
Figura 7. Índice de falhas em transformador regulador.....	25
Figura 8. Concentração do Campo Elétrico em Buchas Condensivas. FONTE: (SOARES, 2010).....	27
Figura 9. Detalhe construtivo de uma bucha condensiva com <i>tap</i> capacitivo, (BAGHERI et al., 2011)	29
Figura 10. <i>Tap</i> Capacitivo de Bucha Condensiva sem tampa.....	29
Figura 11. Transformador visto como um sistema fechado (FESER et al., 2000)	31
Figura 12. Circuito básico de medição de SFRA.....	35
Figura 13. Comportamento das impedâncias resistiva, capacitiva e indutiva em função da frequência.....	37
Figura 14. Gráfico da magnitude (a) e ângulo de fase da função transferência de um ensaio de resposta em frequência	38
Figura 15. Exemplo de gráfico comparativo entre duas curvas diferentes (realizada em momentos distintos no mesmo equipamento) da função transferência.....	39
Figura 16. Regiões de análise de resposta em frequência em transformadores	40
Figura 17. Esquema representativo da configuração de ensaio “Início-Final do Enrolamento”.....	42
Figura 18. Exemplo de resposta em frequência em terminal de alta tensão na configuração Início-Final do enrolamento (PICHER et al., 2008).....	42
Figura 19. Exemplo de resposta em frequência em terminal de baixa tensão na configuração Início-Final do enrolamento (PICHER et al., 2008).....	43
Figura 20. Exemplo de diferença entre medição com e sem curto-circuito na baixa-tensão (PICHER et al., 2008)	44
Figura 21. Exemplo de arranjo de medição da capacitância entre enrolamentos AT e BT (PICHER et al., 2008).....	44
Figura 22. Exemplo de arranjo de medição de indutância entre enrolamentos da AT e da BT (PICHER et al., 2008).....	45
Figura 23. Metodologia para ensaios de SFRA <i>on-line</i>	53

Figura 24. Resposta em frequência injetando sinal no <i>tap</i> e medição da tensão de saída em outro <i>tap</i> (BAGHERI et al., 2011)	55
Figura 25. Resposta em frequência injetando sinal no <i>tap</i> e medição da corrente de saída no aterramento do neutro	55
Figura 26. Impedância Z_p introduzida em paralelo com a capacitância C2 da bucha (BAGHERI et al., 2011)	57
Figura 27. Arranjo de medição de resposta em frequência do transformador energizado <i>tap a tap</i>	59
Figura 28. Arranjo de medição de resposta em frequência do transformador energizado <i>tap a TC</i>	59
Figura 29. Circuito de medição da capacitância C1 de buchas.....	61
Figura 30. Circuito de medição da capacitância C2 da bucha	61
Figura 31. Efeito da variação da carga no ensaio de resposta em frequência. FONTE: (SOYSAL, 1993)	63
Figura 32. Efeito da variação da carga no ensaio de resposta em frequência. FONTE: (SETAYESHMEHR et al., 2009).....	64
Figura 33. Transformador de 6 MVA utilizado nos ensaios de SFRA	66
Figura 34. (a) Hardware e Software do equipamento FRAX 101 e (b) cabos e conexões utilizados na medição de SFRA	67
Figura 35. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 1, Configuração 17 e Configuração 18.....	69
Figura 36. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 1 e Configuração 17	70
Figura 37. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 16 e Configuração 19	70
Figura 38. Medição da capacitância C1 no transformador em campo	72
Figura 39. Caracterização da capacitância principal C1 da bucha.....	73
Figura 40. Caracterização da capacitância C2.....	73
Figura 41. Circuito equivalente da bucha de alta tensão do transformador T2	74
Figura 42. Filtro Butterworth passa-faixa.....	75
Figura 43. Filtro passa-faixa simplificado	75
Figura 44. Ganho dos filtros <i>Butterworth</i> e Filtro Simplificado.....	76
Figura 45. Circuito de simulação da bucha e filtro de proteção.....	77
Figura 46. Filtro de proteção para SFRA <i>on-line</i>	77
Figura 47. Resposta em frequência do filtro nas configurações de entrada 1 e 2	78
Figura 48. Adaptação do circuito de proteção ao <i>tap</i> de bucha condensiva	79
Figura 49. Linhas de transmissão conectando o transformador às buchas de passagem.....	80
Figura 50. Carga resistiva trifásica alimentada por transformador trifásico de 112,5 kVA e conjunto de TPs e TCs de medição	81
Figura 51. Resposta em frequência da configuração fase e neutro com filtro de proteção e transformador desenergizado.....	82
Figura 52. Comparação entre respostas de sinais injetados pelo <i>tap</i> , com e sem filtro.....	83

Figura 53. Comparação entre sistemas energizado e desenergizado (com proteção), entre fase e neutro (H1-H0)	84
Figura 54. Detalhe comparativo das respostas entre sistema energizado e desenergizado com variação de tensão (H1-H0)	85
Figura 55. Comparação entre sistema energizado à vazio e sistema energizado com cargas.....	86
Figura 56. Comparação entre sistemas energizados com diferenças nas posições dos comutadores.....	87
Figura 57. Comparação entre respostas de sinais injetados pelo tap e medido em outro <i>tap</i> com e sem filtros	88
Figura 58. Comparação entre sistema energizado e desenergizado (H2-H3) .	89
Figura 59. Comparação entre sistema energizado e desenergizado com aplicação de alisamento digital.....	90
Figura 60. Comparação entre sistemas energizado à vazio e com cargas	91
Figura 61. Comparação entre sistemas energizados com diferenças nas posições dos comutadores.....	91
Figura 62. Resposta em Frequência – Configuração 1	97
Figura 63. Resposta em Frequência – Configuração 2	97
Figura 64. Resposta em Frequência – Configuração 3	98
Figura 65. Resposta em Frequência – Configuração 4	98
Figura 66. Resposta em Frequência – Configuração 5	99
Figura 67. Resposta em Frequência – Configuração 6	99
Figura 68. Resposta em Frequência – Configuração 7	100
Figura 69. Resposta em Frequência – Configuração 8	100
Figura 70. Resposta em Frequência – Configuração 9	101
Figura 71. Resposta em Frequência – Configuração 10	101
Figura 72. Resposta em Frequência – Configuração 11	102
Figura 73. Resposta em Frequência – Configuração 12	102
Figura 74. Resposta em Frequência – Configuração 13	103
Figura 75. Resposta em Frequência – Configuração 14	103
Figura 76. Resposta em Frequência – Configuração 15	104
Figura 77. Diagrama Unifilar da Subestação do Lactec – Circuito de Energiação do Transformador T-2 de 6 MVA.....	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. VANTAGENS DOS MÉTODOS DE SFRA E IFRA.....	33
TABELA 2. DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE SFRA E IFRA	34
TABELA 3. CONFIGURAÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO ESTRELA-DELTA DE DOIS ENROLAMENTOS (IEC 60076-18).....	46
TABELA 4. CONFIGURAÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA REALIZADAS NO TRANSFORMADOR SOB ENSAIO.....	57
TABELA 5. VALORES DAS CAPACITÂNCIAS C1 E C2 MEDIDOS	71
TABELA 6. PARÂMETROS RLC SÉRIE DOS RAMOS DE C1 E C2	73

LISTA DE ABREVIATURAS

AT	- Alta Tensão
BT	- Baixa Tensão
SFRA	- <i>Sweep Frequency Response Analysis</i>
IFRA	- <i>Impulse Frequency Response Analysis</i>
UHF	- <i>Ultra High Frequency</i>
SEP	- Sistema Elétrico de Potência
CIGRE	- <i>Conseil International dês Grands Réseaux Electriques</i>
IEC	- <i>International Electrotechnical Comission</i>
IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
AT	- Alta Tensão
BT	- Baixa Tensão
SMD	- <i>Surface Mount Device</i>
OLTC	- <i>On Load Tap Changer</i>
OIP	- <i>Oil Impregnated Paper</i>
RIP	- <i>Resin Impregnated Paper</i>
TC	- Transformador de Corrente
FRA	- <i>Frequency Response Analysis</i>
LVI	- <i>Low Voltage Impulse</i>
DETC	- <i>De-Energized Tap Changer</i>
NBI	- <i>Nível Básico de Isolamento</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 OBJETIVOS	18
1.4 CONTRIBUIÇÕES	19
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 BUCHAS DE ALTA TENSÃO	26
3. ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES	30
3.1 INTRODUÇÃO	30
3.2 ENSAIO DE REPOSTA EM FREQUÊNCIA (SFRA)	35
3.3 CIRCUITOS DE TESTE E CONEXÕES	41
3.4 RECOMENDAÇÕES PARA MEDIÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA.....	46
4. ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES – MÉTODO ON-LINE.....	49
4.1 INTRODUÇÃO	49
4.2 SFRA <i>ON-LINE</i>	51
4.3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA ATRAVÉS DE SINAIS INJETADOS PELO <i>TAP</i> CAPACITIVO.....	54
4.4 CIRCUITO DE PROTEÇÃO	57
4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BUCHAS	60
4.6 INFLUÊNCIA DE CARGAS LIGADAS AO SISTEMA.....	63
5. ESTUDO DE CASO	65
5.1 INTRODUÇÃO	65
5.2 OBJETO DE ESTUDO	65
5.3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA – MÉTODO NORMALIZADO	67
5.4 RESULTADOS DE ENSAIOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA ATRAVÉS DE SINAIS INJETADOS PELO <i>TAP</i> CAPACITIVO	68
5.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BUCHAS CONDENSIVAS.....	71
5.6 CIRCUITO DE PROTEÇÃO	74
5.7 ARRANJO DE ENSAIO.....	79
5.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SFRA <i>ON-LINE</i> ENTRE FASE E NEUTRO.....	81
5.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SFRA <i>ON-LINE</i> ENTRE FASES.....	88
6. CONCLUSÕES	93
6.1 TRABALHOS FUTUROS	96
APÊNDICE 1 - RESULTADOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PELO MÉTODO NORMALIZADO.....	97
ANEXO 1 – DIGRAMA UNIFILAR DE SUBESTAÇÃO DOS INSTITUTOS LACTEC	105
REFERÊNCIAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O Sistema Elétrico de Potência é formado por geradores, transformadores elevadores e abaixadores, linhas de transmissão e alimentadores de distribuição. Como os geradores trabalham com tensões da faixa de 10 a 30 kV faz-se necessário o uso de transformadores elevadores, elevando a tensão de geração para níveis de subtransmissão ou transmissão, como por exemplo, 230 kV, 500 kV e 750 kV, e assim diminuir as perdas no sistema. Eles operam através de indução eletromagnética, transferindo energia de um terminal a outro, mantendo a frequência e variando a tensão e corrente. Em seguida, nas subestações interligadoras, a energia é recebida de uma ou mais fontes e novamente transmitida aos grandes centros consumidores. Nestes encontram-se as subestações de distribuição, na qual a tensão é novamente reduzida para tensão de distribuição através de transformadores abaixadores até os consumidores.

A Figura 1 mostra um exemplo de SEP (Sistema Elétrico de Potência) e a aplicabilidade dos transformadores nesse contexto. Nota-se, portanto, a importância de tais equipamentos para um sistema elétrico interligado. Por isso, sua confiabilidade é essencial para o bom funcionamento de uma malha energética, pois é através destes que passa toda a energia proveniente das unidades geradoras até os consumidores finais. Além disso, possuem custo e manutenção elevados, e, a sua eventual substituição, incluindo o projeto, processo de fabricação, transporte e comissionamento podem levar meses. A falta desses equipamentos podem gerar grandes prejuízos financeiros para as concessionárias de energia elétrica, tanto do ponto de vista do equipamento em si, quanto do ponto de vista da falta de fornecimento de energia.

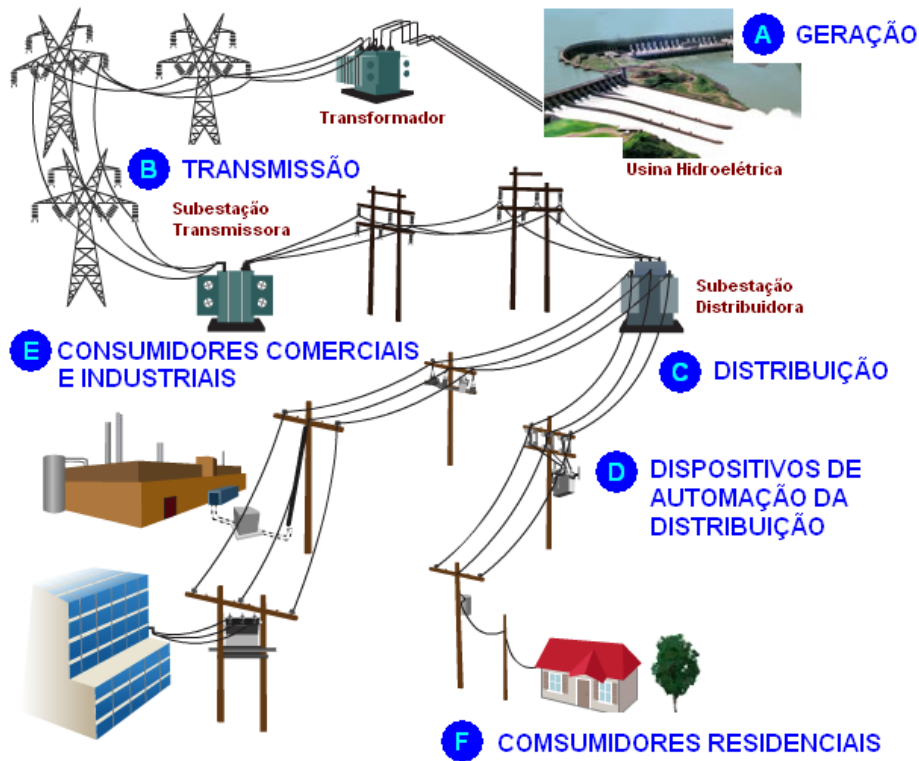


Figura 1. Esquema representativo de um sistema elétrico (FONTE: “Como a ‘rede’ é hoje?”)

Segundo (ABDO, 2004), “provocar desligamento ou permitir a sua propagação no sistema elétrico em decorrência de falha de planejamento ou de execução da manutenção ou operação de suas instalações”, constitui infração, sujeita à imposição de multas às concessionárias de energia elétrica. Portanto, estas em conjunto com grandes fabricantes de equipamentos têm concentrado seus esforços no diagnóstico e monitoramento dos transformadores, de modo que o tempo de vida útil desses equipamentos seja o mais prolongado possível. Com o emprego de ferramentas de diagnóstico e manutenção adequadas, a vida útil dos transformadores (da faixa de potência de kVA a MVA) pode chegar a até 60 anos segundo (VANDERMAAR; WANG, 2002).

Grande parte das falhas em transformadores são causadas por eventos externos tais como impulsos atmosféricos, impulsos de manobra, curtos-circuitos, transitórios de frente muito rápida, falhas de sincronização e outros. Quaisquer dessas condições podem levar ao colapso imediato destes equipamentos ou danificá-los de tal modo que esses passem a operar cada vez

mais perto da iminência da ocorrência das falhas e conseqüentemente a parada da máquina.

Diante desse cenário, diversas técnicas de diagnóstico, manutenção preditiva e preventiva foram desenvolvidas com objetivo de garantir o funcionamento de equipamentos de subestação, sendo dada maior atenção aos transformadores (VANDERMAAR; WANG, 2002), (SETAYESHMEHR et al., 2004).

Dentre as diversas técnicas de diagnóstico pode-se citar: a medição de fator de potência e capacitância; a medição de descargas parciais; relação de tensão; medição de resistência ôhmica dos enrolamentos; medição de resistência do isolamento; medições de temperatura; análise físico-químicas do óleo; e a análise de resposta em frequência (GILL, 1941). A análise do uso de medições de resposta em frequência para diagnóstico de transformadores é o objeto de estudo deste trabalho.

A técnica, também conhecida como FRA (*Frequency Response Analysis*) (AGILENT, 2003), é aplicável na análise de componentes elétricos ou eletrônicos, circuitos e equipamentos com o intuito de se obter resultados relacionados com o comportamento dinâmico destes sistemas em função da variação de frequência do sinal de entrada. É uma ferramenta amplamente utilizada em diversos segmentos da área da engenharia elétrica, como eletrônica e telecomunicações e, há alguns anos vem sendo aplicada na eletrotécnica e no sistema elétrico de potência.

Em sistemas elétricos de potência, em particular no caso de transformadores de potência, o estudo da resposta em frequência é uma poderosa ferramenta de análise que pode mostrar indícios de deformações nos enrolamentos e no núcleo desses equipamentos devido aos eventos citados anteriormente. Essas deformações podem gerar falhas de isolamento e descolamentos das bobinas, acarretando em curtos-circuitos entre espiras, entre enrolamentos ou ainda entre enrolamentos e terra (DICK; ERVEN, 1978), (GILLIES; HUMBARD; ROGERS, 1972).

O diagnóstico em transformadores de potência através da análise de resposta em frequência tornou-se, nos últimos anos, uma técnica consagrada sendo definida como um ensaio especial realizado com acordo prévio entre o fabricante e o comprador de acordo com a (NBR 5356-1, 2008), com métodos de ensaio sendo discutidos adequadamente na (IEC 60076-18, 2012), (IEEE PC57.149/D5, 2012) e outros grupos de estudo que abordam o tema. No entanto, as técnicas de diagnóstico utilizadas como manutenção preventiva citadas, incluindo a resposta em frequência, não tem sido suficiente para evitar grandes falhas em transformadores de potência no sistema elétrico.

Uma das possíveis razões é que tais técnicas tem a peculiaridade de serem realizadas em paradas programadas, sendo necessária a desenergização e desconexão dos equipamentos do sistema, tornando um ensaio relativamente rápido em uma tarefa demorada e onerosa para as concessionárias. Logo, sua realização pode não estar sendo feita na frequência necessária para se evitar possíveis problemas.

Desta maneira, mesmo quando os transformadores sofrem solicitações (tais como sobretensões) inerentes à operação contínua no sistema, nem sempre é possível realizar intervenções imediatas para análise das condições do equipamento após o evento, e, dependendo da situação, uma análise ainda mais detalhada, como por exemplo, a manutenção e análise de falha no equipamento. No entanto, estes eventos podem diminuir as características de isolamento originais do transformador, fazendo com que ocorram falhas geradas por uma sucessão de eventos externos.

A fim de melhorar as condições das análises pré-faltas, as concessionárias de energia elétrica tem optado cada vez mais em investir em técnicas de monitoramento *on-line*, ou seja, métodos de análise em tempo real e/ou com o transformador energizado para obtenção de dados que permitam antever o colapso desses equipamentos sem a parada da máquina e seus custos associados (FRONTIN, 2013).

Na verdade, o monitoramento de transformadores iniciado à partir da década de 80 e final dos anos 90, vem se intensificando nos últimos anos devido à aplicação de microcontroladores, reduzindo o custo dos projetos de

monitoramento em tempo real. Dessa maneira, técnicas consolidadas de diagnóstico tem sido revistas para promover sua aplicabilidade em sistemas energizados. A Figura 2 apresenta um exemplo de sistema de monitoramento de descargas parciais, através da introdução de sensor UHF de descargas parciais (DP) introduzido no tanque do transformador.

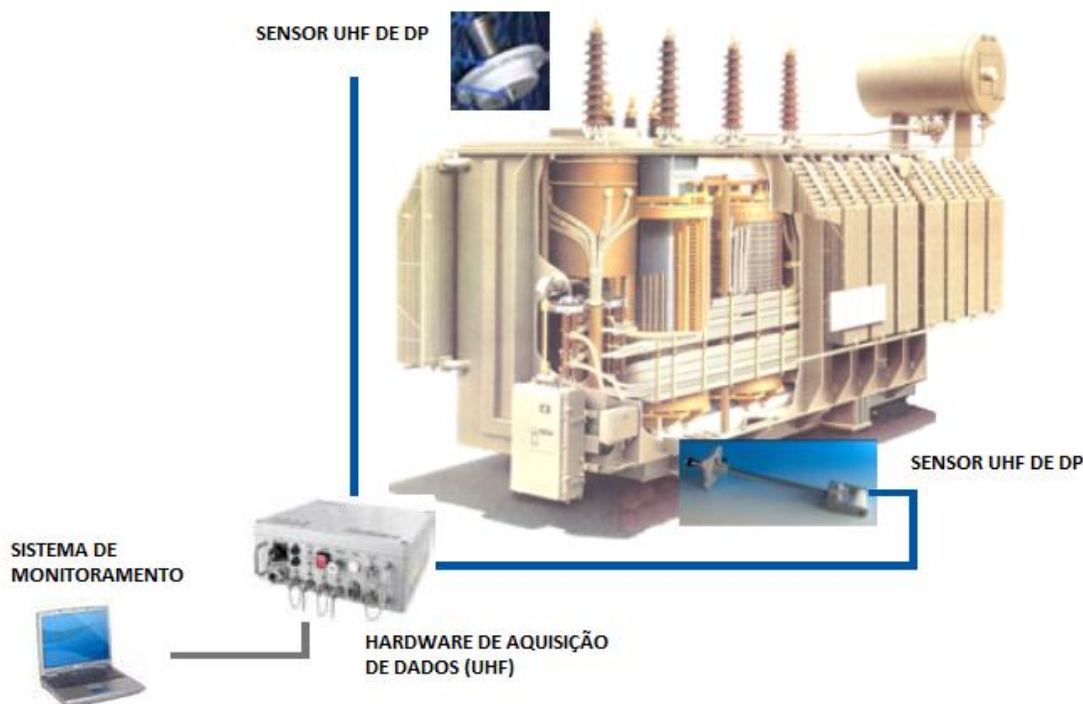


Figura 2. Exemplo de sistema de monitoramento de Descargas Parciais em transformadores (Catálogo Doble Lemke)

Uma dessas técnicas é a de análise de resposta em frequência, o qual se utiliza de duas ideias principais: a de injeção de sinais impulsivos no transformador e verificação destes no domínio da frequência e de injeção de sinais com frequência variável (o qual será utilizada neste trabalho) utilizando-se a derivação capacitiva (*tap*) de buchas condensivas para tal finalidade. Ambas as técnicas são aplicáveis em sistemas energizados, sem que seja necessária a parada do equipamento para execução do diagnóstico, sendo possível criar um sistema de monitoramento de apoio à tomada de decisões. Para isso, é necessário o estudo e desenvolvimento das técnicas para em seguida estas serem aplicadas em sistemas de monitoramentos *on-line*.

1.2 JUSTIFICATIVA

Para realização de ensaios de resposta em frequência o transformador deve ser desenergizado e desconectado do sistema, a fim de que não hajam influências de conexões e demais impedâncias do sistema. Isto causa impactos negativos para as concessionárias de energia elétrica, em termos de custo e tempo de execução decorrentes da necessidade de tirar o equipamento de operação. A motivação deste trabalho é de contornar estas questões, utilizando técnicas de monitoramento *on-line*, ou seja, através de um método de análise de resposta em frequência com o transformador energizado, a fim da obtenção de dados que permitam antever o colapso desses equipamentos sem retirá-los de operação de forma não planejada, e, portanto, sem causar prejuízos. Ao contrário do monitoramento *off-line*, a utilização de monitoramento *on-line* baseado na utilização de resposta em frequência ainda não está consolidada na literatura tornando necessário o desenvolvimento de métodos e metodologias que torne este procedimento confiável.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia de medição de resposta com varredura de frequência (conhecido como SFRA) para transformadores energizados, ou SFRA *on-line*. O método será validado comparando-se as respostas do transformador energizado (*on-line*) com as respostas tradicionais de SFRA para transformadores desenergizados (*off-line*).

A metodologia é analisada sob diferentes condições de carga (aqui analisadas via alterações do sistema, como a inclusão de cargas no circuito externo do transformador) para verificação do impacto do carregamento do transformador nas respostas obtidas. Isto é uma particularidade das abordagens *on-line* visto que o transformador está conectado ao sistema, ao contrário do procedimento *off-line*.

Para exemplificar a metodologia proposta de SFRA *on-line*, será utilizado um transformador trifásico elevador de 72,5 kV no terminal de tensão superior situado na subestação do LACTEC. O transformador sob análise possui em suas buchas de alta tensão derivações capacitivas (*taps*) que serão utilizadas para aplicação dos sinais injetados com variação de frequência. Todos os estudos de medição serão realizados utilizando-se como base este transformador.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Ao final desta dissertação será possível avaliar, através da análise experimental, o método de injeção de sinal através da derivação capacitiva de uma bucha de alta tensão de um transformador, apresentando vantagens e desvantagens do método, técnicas para implementação da metodologia e indicar possíveis melhorias e futuros estudos para evolução da técnica de resposta em frequência *on-line*.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 dessa dissertação será apresentada uma revisão bibliográfica acerca de transformadores, de métodos de diagnóstico para estes equipamentos e de buchas de alta tensão, as quais estão diretamente ligadas aos ensaios de resposta em frequência.

No Capítulo 3, a análise de resposta em frequência em transformadores será abordada, apresentando a evolução do estudo, discutidas as recomendações das normas e grupos de estudo, além de demais considerações envolvendo o tema.

No Capítulo 4, o tema de análise de resposta em frequência será aplicado na condição *on-line*, ou seja, com transformador energizado. Discorre-se sobre suas aplicações, evolução dos estudos, e recentes publicações.

No Capítulo 5 será apresentado um estudo de caso com aplicação das técnicas de SFRA *on-line* em um transformador de potência. Será também apresentado o desenvolvimento de um sistema de proteção para monitoração *on-line*, avaliadas as melhores configurações de medição e realizada uma análise envolvendo cargas, capacitivo-resistivas, nas medições *on-line*.

No Capítulo 6 são apresentadas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

No Apêndice 1 são apresentados gráficos de função de transferência de respostas em frequência e um diagrama unifilar da subestação na qual o transformador sob análise está situado.

2. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Transformadores são equipamentos de funcionamento relativamente simples e de tecnologia de construção já consolidada por grandes fabricantes. No entanto, quanto maior a potência do equipamento, maior o nível de complexidade do projeto e de fabricação da parte ativa e dos elementos envolvidos, tais como sistema de refrigeração, sensores, dispositivos de proteção, buchas de alta tensão, dentre outros. Além disso, visto que os transformadores fazem parte do sistema elétrico, interações entre estes passam a fazer parte do objeto de estudo, e como consequência o equipamento deve ser projetado para atender as características de suportabilidade elétricas de todo o sistema elétrico de potência. Diante disso, várias técnicas de diagnóstico foram desenvolvidas a fim de acompanhar o processo de fabricação e manutenção do equipamento ao longo de sua vida útil.

De acordo com a NBR 5356, “transformador é um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sinal de tensão e corrente alternadas em outro sinal de tensão e corrente, de valores geralmente diferentes mas à mesma frequência, com o objetivo de transmitir potência elétrica (ou informação na forma de sinais elétricos).” De maneira simplificada, um transformador transmite energia ou potência elétrica de um circuito para outro, transformando tensões e correntes, inclusive modificando as impedâncias de um circuito elétrico. Além disso, o transformador é classificado como elevador ou abaixador, dependendo da sua função e posição no sistema.

Construtivamente, a região formada pelo núcleo e pelos enrolamentos do transformador é chamada de parte ativa. É na parte ativa que os mecanismos de conversão de energia se dão e, portanto, é a região de maior interesse nos estudos de transformador.

O núcleo é fabricado através da superposição de chapas metálicas de ferro-silício de grãos orientados. A principal finalidade do núcleo é transportar o

fluxo magnético de modo que ocorra a indução no terminal secundário. Os enrolamentos, por sua vez, são condutores, de cobre ou alumínio, isolados com esmalte, verniz, fitas de algodão ou papel especial, formando bobinas que podem variar construtivamente de acordo com tipo do projeto. A Figura 3 apresenta as bobinas de um transformador montados ao redor do núcleo antes da inserção no tanque. Normalmente são montados concentricamente ao núcleo, formando camadas de bobina, papel, separados por espaçadores permitindo a circulação de óleo. Além disso, esses espaçadores também são utilizados como sustentação mecânica, evitando o deslocamento dos enrolamentos. Na parte ativa encontra-se também os comutadores, que fazem a adequação da tensão de operação aos níveis de tensão da rede, melhorando a regulação do sistema, podendo ser à vazio ou sob carga. É a única peça móvel do transformador e, portanto, é o ponto com maior índice de falhas. Além desses elementos, os transformadores de grandes potências, após a sua montagem, são preenchidos com líquidos isolantes, de baixa viscosidade, destinados à refrigeração e isolação (possuem alta rigidez dielétrica) do transformador. Finalmente, transformadores de potência são providos de vários outros itens que contribuem para o bom funcionamento do equipamento durante seu regime de operação, tais como: tanque, radiadores, indicador do nível de óleo, termômetros, controladores de temperatura, reles de proteção e buchas, as quais serão objetos de estudo no item subsequente (SOARES, 2010).



Figura 3. Enrolamentos montados no núcleo do transformador

Portanto, vários aspectos estão presentes no projeto de um transformador. Dentre eles, o dimensionamento equilibrado entre as dimensões do núcleo e o número de espiras da bobina (quanto menos espiras, maior o núcleo e vice-versa), a classe de isolamento dos enrolamentos, a secção dos condutores utilizados, bem como sua construção em panquecas (ou pastilhas) ou bobina única, a escolha do tipo do núcleo, se envolvente ou envolvido, o tipo dos comutadores, o tipo de encapsulamento, o número de fases e o tipo de ligação (delta-estrela, estrela-delta, etc.), o tipo de refrigeração, a escolha dos acessórios, e até mesmo a escolha do líquido isolante. Todos estes aspectos conferem ao transformador uma característica única para cada projeto (MAMEDE FILHO, 2013).

As correntes que circulam nos enrolamentos do transformador provocam interação de campos magnéticos que por sua vez geram esforços mecânicos no interior do equipamento. Desta maneira o projeto deve conceber características construtivas para suportar tais esforços, mantendo os parâmetros elétricos de funcionamento permanente (KOJIMA et al., 1980). No entanto, a maior parte das falhas são decorrentes do envelhecimento e deterioração da isolação, devido a fatores térmicos, elétricos, químicos e mecânicos, juntamente com operações e interações com sistema elétrico, tais como sobretensões, ressonâncias, faltas próximas em uma linha e outros eventos. Tais solicitações podem promover forças eletrostáticas e forças eletrodinâmicas e conseqüentemente esforços mecânicos no transformador, alterando as características internas do equipamento.

Em consequência, devido às alterações das propriedades isolantes, aumenta-se consideravelmente a probabilidade de ocorrência de falhas em pontos de maior esforço mecânico e mais frágeis do ponto de vista de suportabilidade dielétrica. Além disso, componentes externos ao transformador também podem ser preponderantes para alteração mecânica do núcleo, tais como vácuo, sobrepressões internas, deformações do tanque e terremotos.

Os esforços mecânicos provocados no transformador podem ser radiais, axiais ou ainda deslocamento dos enrolamentos. Esses casos, ilustrados pelas Figura 4, Figura 5 e Figura 6, respectivamente as deformações podem

provocar a diminuição das distâncias elétricas (enrolamento externo ao tanque, e entre núcleo e enrolamento interno, entre enrolamentos, etc.), alterações do campo elétrico, estiramento do material isolante, e até afrouxamento das amarrações internas do transformador. Dessa maneira ocorrem vibrações adicionais ao transformador, redução da capacidade de suportar surtos de tensões e correntes de curto-circuito, envelhecimento prematuro do material isolante e consequente diminuição da vida útil do equipamento (CARVALHO; MENDES; CORREIA, 2013).

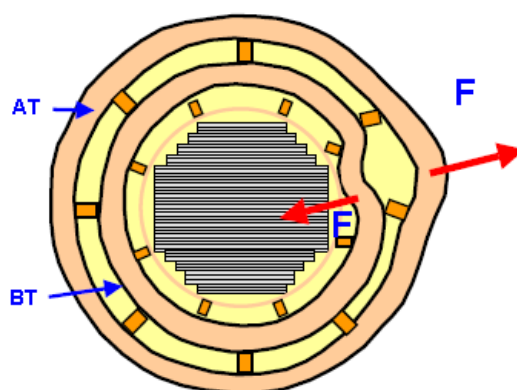


Figura 4. Esforço radial nos enrolamentos (PAULINO, 2009)

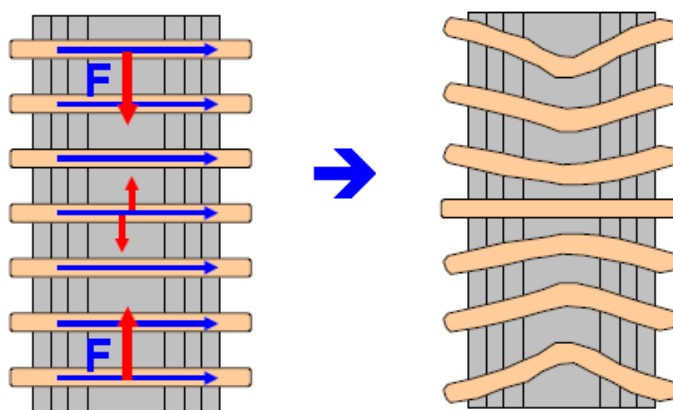


Figura 5. Esforço axial nos enrolamentos (PAULINO, 2009)

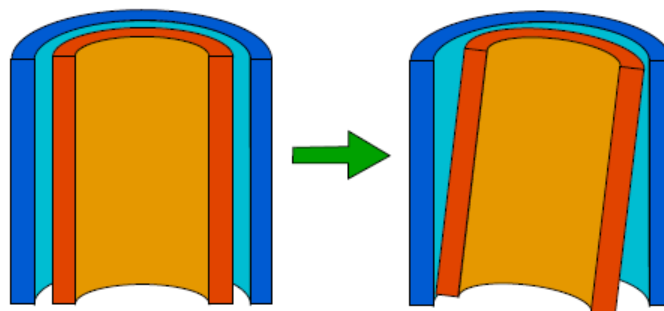


Figura 6. Deslocamento de uma das bobinas do transformador (AGUIAR, 2007)

De acordo com (CARVALHO; MENDES; CORREIA, 2013), o percentual de ocorrência de falhas em um transformador regulador, de acordo com a Figura 7, é na maior parte atribuído aos comutadores sob carga (OLTC – *on-load tap changer*), seguido dos enrolamentos. O núcleo é o último índice de falhas em um transformador, indicando que os esforços mecânicos são menores nessa região.

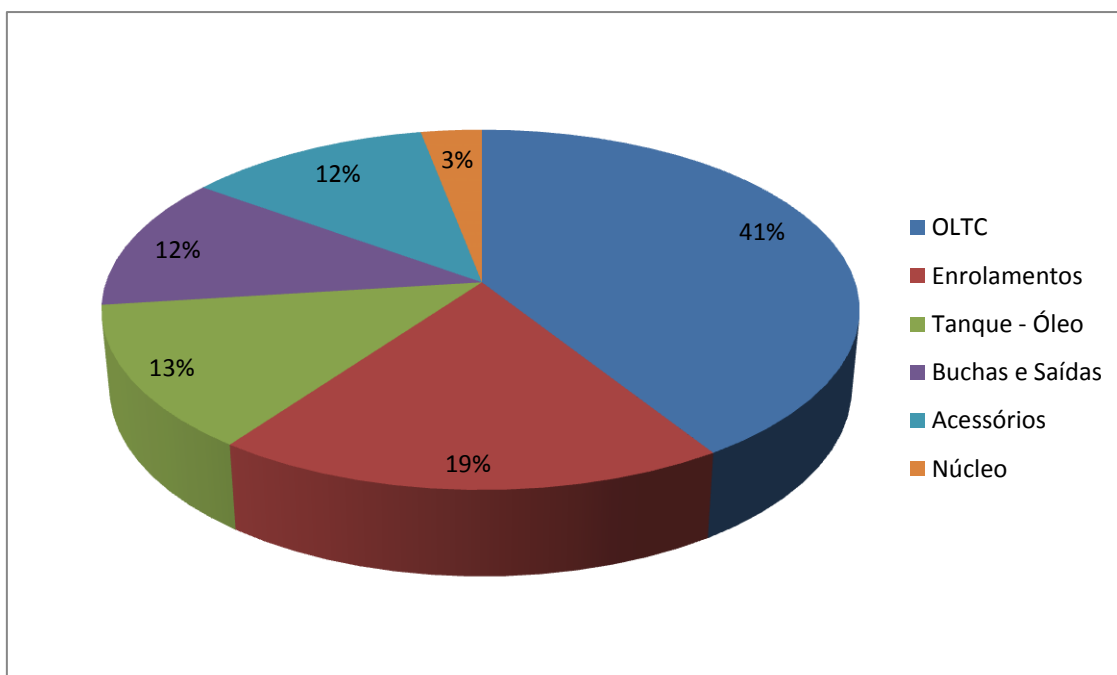


Figura 7. Índice de falhas em transformador regulador.

As principais ferramentas de diagnóstico e detecção de deformações em bobinas são:

- Medição de impedância de curto-circuito;
- Medição da corrente de excitação;
- Medição de Capacitância;
- Medição de Resposta em Frequência

Visto que as alterações mecânicas também alteram as características elétricas do transformador, podemos observar que a capacitância entre os enrolamentos e entre os enrolamentos e a massa podem sofrer alterações devido às mudanças das geometrias da parte ativa. A corrente de excitação, em casos de deformações ou curto-circuito entre lâminas do núcleo, é aumentada comparativamente com a corrente de excitação de regime de operação do transformador. Do mesmo modo, a mudança na distância entre os enrolamentos alteram o fluxo magnético, e conseqüentemente introduzem alterações na impedância de curto-circuito do transformador. No caso da resposta em frequência, o conceito é parecido com os demais, especialmente, no que diz respeito à capacitância, além das resistências e indutâncias envolvidas na construção de um transformador. Ao ocorrer alterações em qualquer desses parâmetros a resposta final em função da frequência sofrerá alterações perceptíveis em seu resultado (WADHWA, 2007).

2.2 BUCHAS DE ALTA TENSÃO

De acordo com a NBR 5034, uma bucha é definida como “peça ou estrutura de material isolante, que assegura a passagem isolada de um condutor através de uma parede não isolante”. No caso do transformador, essa parede isolante é o tanque metálico, ou seja, os enrolamentos são diretamente acoplados às buchas, que por sua vez, através de um condutor central, isolado adequadamente, transmitem as altas tensões até as conexões externas do transformador de maneira segura e com uniformidade do campo magnético.

Existem diversos tipos de buchas, classificadas quanto a sua aplicação, tipo de isolamento interna (papel impregnado com óleo - OIP, papel aglutinado com resina e papel impregnado com resina - RIP), tipo de enchimento (líquido ou gasoso), corpo isolante externo (cerâmica ou polimérica) e tecnologia de fabricação (condensiva e não-condensiva).

As buchas não-condensivas (sólidas), em geral, são utilizadas em tensões inferiores a 25 kV e são fornecidas sem condutor central e são construídas solidamente em porcelana ou epóxi .

As buchas condensivas por sua vez, são construídas internamente, por diversas camadas condutoras ao redor do condutor central, espaçadas radialmente com preenchimento de papel especial com óleo ou resina impregnados formando diversas capacitâncias entre o condutor e o terra, de modo que o campo elétrico da bucha seja menor e uniforme próximo ao ponto crítico, ou seja, no flange diretamente aterrado. A Figura 8 apresenta a concentração do campo elétrico em uma bucha (WAGENAAR, 2004).

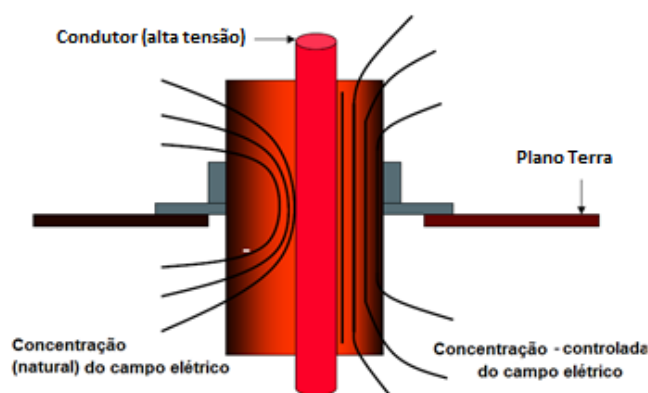


Figura 8. Concentração do Campo Elétrico em Buchas Condensivas. FONTE: (SOARES, 2010)

Os fabricantes utilizam essas capacitâncias para formar um divisor capacitivo no qual a capacitância formada entre o condutor central e a penúltima camada condutora é chamada de C1 (soma de várias capacitâncias intermediárias) enquanto que a capacitância formada pela penúltima camada condutora e o terra é chamada de C2. Finalmente, um condutor é inserido na penúltima camada e levado, eletricamente isolado, até a parte externa da

bucha como pode ser observado na Figura 9. O divisor formado pelas capacitâncias C1 e C2 fornece em sua derivação (*tap* capacitivo ou derivação capacitiva) uma tensão de saída V_{tap} menor que a tensão do terminal de alta tensão do transformador V_{fase} (fase-terra), conforme a Equação 1.

$$V_{tap} = V_{fase} \frac{C1}{C1+C2} \quad (1)$$

Normalmente, durante a operação do transformador, ou seja, com tensão nominal, a derivação capacitiva permanece aterrada através de um acoplamento metálico (tampa) conectado diretamente à flange da bucha, como pode ser observado na Figura 10 onde o *tap* está desaterrado, ou seja, sem tampa de proteção.

Portanto, as buchas além de proporcionarem uma conexão segura entre o enrolamento do transformador e o barramento da subestação, podem proporcionar, através dos *taps* capacitivos, uma conexão dos enrolamentos com o meio externo, com redução das altas tensões durante a operação do transformador no sistema elétrico. Atualmente os *taps* capacitivos têm sido utilizados para monitoramento das condições das buchas e até mesmo dos transformadores (BAGHERI et al., 2011).

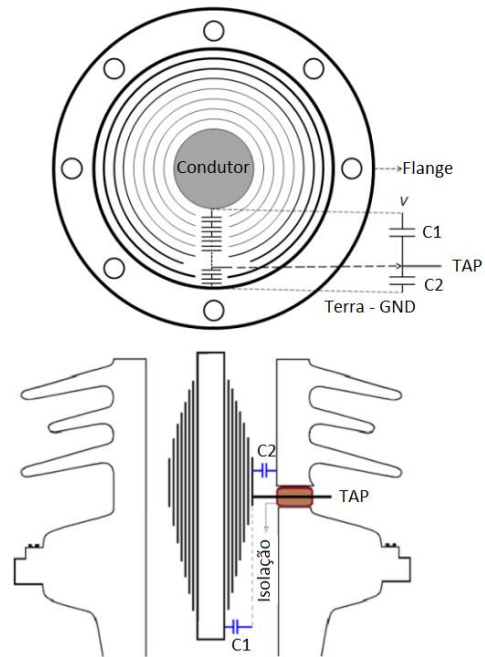


Figura 9. Detalhe construtivo de uma bucha condensiva com *tap* capacitivo, (BAGHERI et al., 2011)



Figura 10. *Tap* Capacitivo de Bucha Condensiva sem tampa

3. ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados aspectos da técnica de diagnóstico em transformadores, genericamente conhecida como FRA (*Frequency Response Analysis*) ou Análise de Resposta em Frequência, onde serão abordadas as técnicas para realização dos testes, configurações e conexões aplicáveis à um transformador, e recomendações das normas e comitês de estudo para a boa prática dos ensaios.

A análise de resposta em frequência em transformadores de potência é uma ferramenta de diagnóstico que pode dar indícios de deformação do seu núcleo ou dos seus enrolamentos. A técnica consiste na aplicação de sinais de baixa amplitude, no domínio do tempo ou da frequência, com medição da tensão de entrada e tensão de saída. O conceito básico é a comparação entre curvas de resposta em frequência ou de resposta temporal em instantes de tempo diferentes. A primeira medição, realizada ainda na fábrica, é definida como assinatura do transformador ou curva característica. Em um instante de tempo futuro, a mesma medição é realizada novamente, nas mesmas condições da assinatura original. As duas medições são comparadas e, desta comparação, um diagnóstico pode ser fornecido. Além disso, de acordo com o tipo de transformador, pode-se ter como definição uma entrada e várias combinações de saída possíveis, conforme (FESER et al., 2000). A Figura 11 apresenta um transformador visto como um sistema de duas entradas (H_1-H_0) e n saídas ($X_1-X_0, X_2-X_0, \dots, X_n-X_0$).

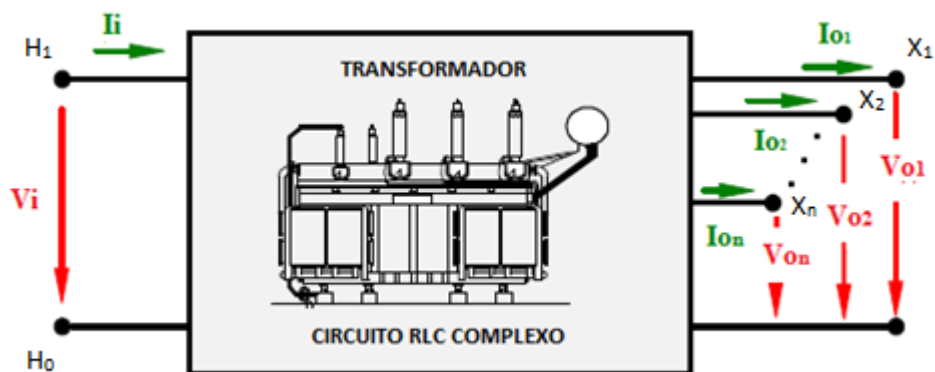


Figura 11. Transformador visto como um sistema fechado (FESER et al., 2000)

Os primeiros estudos de resposta em frequência relacionados com diagnósticos de transformadores em função de deformações do núcleo, que leva em conta as alterações das capacitâncias e indutâncias (visto que esse é tratado de forma geral como um circuito RLC) internas causadas por curto-circuitos e esforços mecânicos, foram propostos em (GILLIES; HUMBARD; ROGERS, 1972). Estes estudos, que culminaram em métodos conhecidos como LVI (*Low Voltage Impulse*), consistem na aplicação e medição de impulsos atmosféricos de baixa tensão (com forma de onda 1,2 / 50 μ s) em um dos terminais do transformador com medição da tensão em outro terminal. Por comparação, no domínio do tempo, entre as respostas obtidas em diferentes momentos históricos (por exemplo, antes e depois dos eventos), é possível determinar o surgimento de danos mecânicos no enrolamento.

Em (VAESSEN; HANIQUE, 1992) foi proposto, alternativamente ao método LVI inicialmente proposto, a aplicação de impulsos atmosféricos de baixa tensão em um dos terminais e medida a tensão e corrente em outro terminal, em seguida esses sinais são convertidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. Neste caso a resposta é obtida em função do objeto de teste e independe da fonte de impulso e do circuito de medição, melhorando a identificação dos resultados uma vez que é promovida uma maior repetibilidade. Atualmente, esta técnica é conhecida como IFRA ou *Impulse Frequency Response Analysis*.

No final da década de 70, nos estudos apresentados por (DICK; ERVEN, 1978), na técnica que hoje é conhecida como SFRA ou *Sweep Frequency Response Analysis*. Nesta técnica, sinais senoidais de baixa amplitude e de frequência variável (fazendo uma varredura no espectro de frequências relevantes para o problema) são injetados e medidos em um dos terminais do enrolamento do transformador e o sinal resultante obtido medido em outro terminal.

Uma vez que o núcleo e os enrolamentos do transformador são considerados como um complexo circuito RLC, e que qualquer alteração em um desses parâmetros promove alterações detectáveis pelos métodos de resposta em frequência, estudos foram desenvolvidos utilizando a função de transferência do transformador com o intuito de detectar as condições físicas deste diante: do envelhecimento, promovido pelas alterações da constante dielétrica do óleo; das alterações no núcleo, através de alterações da relutância e perdas no ferro; das alterações nos enrolamentos, devido as modificações dos valores de capacitância e curto-circuito e falhas de isolamento entre espiras (BAK-JENSEN; MIKKKELSEN, 1995).

Devido à aplicabilidade da resposta em frequência, fabricantes de instrumentos de medição, concessionárias e fabricantes de equipamentos de alta tensão voltaram seus esforços para a disseminação da técnica, apresentando particularidades das medições, equipamentos utilizados, faixas de frequência de ensaios, estudos de casos e finalmente comparação entre técnicas (NOONAN, 1997), (RYDER, 2003), (TENBOHLEN, 2003).

Outros estudos foram apresentados em relação a análise qualitativa dos resultados com aplicação de técnicas matemáticas e computacionais para obtenção de diagnósticos baseados na comparação entre as curvas obtidas no domínio da frequência detectando possíveis falhas no transformador, tais como desvios estocásticos em (BAK-JENSEN; MIKKKELSEN, 1995), redes neurais em (XU; FU; LI, 1999), correlação em (KENNEDY; MCGRAIL; LAPWORTH, 2007), dentre outras.

Com a difusão da técnica de FRA, que se tornou uma ferramenta consagrada de diagnóstico e amplamente utilizada por fabricantes de

transformadores e concessionárias de energia elétrica, tornou-se necessária a criação de comitês normativos, a fim de padronizar a realização dos ensaios. Esses grupos deram origem à IEC 60076-18, publicada em 2012, que normatiza e recomenda configurações de ensaio, faixa de frequências, equipamentos utilizados, dentre outras recomendações para que uma medição de FRA seja realizada de forma adequada.

Conforme visto, a análise de resposta em frequência pode ser realizada através de dois métodos: o IFRA e o SFRA. Diante dessas opções, um estudo comparativo foi realizado em (TENBOHLEN, 2003), apresentando vantagens e desvantagens para cada uma das técnicas. A TABELA 1 apresenta as vantagens, enquanto a TABELA 2 apresenta as desvantagens dos métodos de SFRA e IFRA.

TABELA 1. VANTAGENS DOS MÉTODOS DE SFRA E IFRA

Método	Vantagens
SFRA	<ul style="list-style-type: none"> • Filtragem dos sinais quando são utilizados analisadores de redes ou outros equipamentos com a mesma função; • Uma larga faixa de frequência pode ser varrida; • A resolução pode ser controlada pelo número de pontos de frequência; • Menor quantidade de equipamentos, em relação ao método IFRA, é necessária para realização dos testes.
IFRA	<ul style="list-style-type: none"> • Várias funções podem ser medidas simultaneamente; • O tempo de medição é rápido, visto que depende apenas da aplicação de um impulso

TABELA 2. DESVANTAGENS DOS MÉTODOS DE SFRA E IFRA

Método	Desvantagens
SFRA	<ul style="list-style-type: none"> • Maior tempo de ensaio, em relação ao IFRA, podendo levar alguns minutos, dependendo do número de pontos;
	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa amplitude do sinal.
IFRA	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade de filtragem dos sinais;
	<ul style="list-style-type: none"> • A faixa de frequência é fixa, determinado pelo impulso, sendo mais difícil de detectar defeitos fora da faixa de análise;
	<ul style="list-style-type: none"> • Maior quantidade de equipamentos necessários para realização do ensaio comparativamente com o SFRA.

Nos dois casos, as respostas obtidas são sensíveis à configuração de ensaio, principalmente no que diz respeito aos aterramentos, comprimentos de cabos e equipamentos de medição utilizados (PAULINO, 2009).

Assim sendo, não existe uma melhor técnica para realização dos ensaios de resposta em frequência, mas sim, a técnica mais adequada para um determinado tipo de aplicação (TENBOHLEN, 2003). Neste trabalho, o método utilizado será o SFRA devido às vantagens mencionadas acima, além de outras vantagens que serão explicadas no Capítulo 4.

Na seção 3.2 seguinte, portanto, será estudada a técnica de SFRA discorrendo-se à respeito da base teórica à cerca do assunto, configurações de ensaio, recomendações à respeito das medidas em alta frequência e regiões de análise no domínio da frequência, conforme a (IEC 60076-18, 2012), (IEEE PC57.149/D5, 2012) e (PICHER et al., 2008). Nas seções 3.3 e 3.4 serão mostrados os circuitos de testes e conexões, e, recomendações, respectivamente, para as medições de resposta em frequência de acordo com as normas e comitês de estudo.

3.2 ENSAIO DE REPOSTA EM FREQUÊNCIA (SFRA)

Como visto, no ensaio de SFRA sinais são injetados (com variação de frequência) em um dos terminais do transformador e medidos em outro terminal qualquer, dependendo do enrolamento que se deseja medir. A partir da medição das tensões de entrada (sinal aplicado) e saída do transformador pode-se calcular a impedância, também conhecida como impedância terminal, ou ainda a relação entre as tensões, ganho de tensão ou função transferência. A Figura 12 apresenta o circuito básico de SFRA, em que os sinais são injetados por um gerador de sinais G de impedância interna Z_G . A impedância sob teste, ou seja, o enrolamento do transformador é representado por Z_T . V_i representa a tensão medida no terminal de entrada, usada como sinal de referência, enquanto V_o é a tensão de saída medida em um segundo terminal em relação ao terra (sinal de resposta). As medições de tensão são realizadas através das impedâncias Z_{in} e Z_o , normalmente resistências de 50Ω , por isso, para que se evitem reflexões das medidas, os cabos utilizados na medição e a impedância de entrada dos instrumentos de medição devem estar casados com impedâncias de 50Ω .

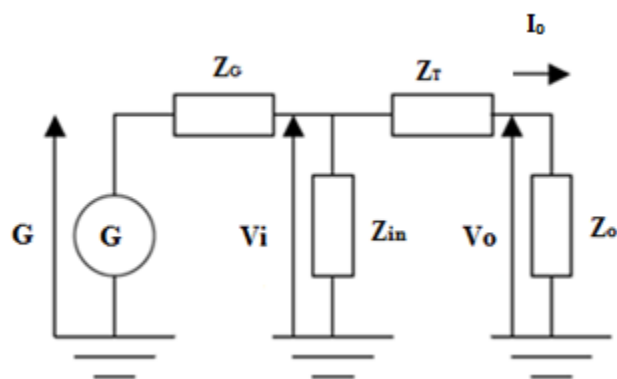


Figura 12. Circuito básico de medição de SFRA

A resposta é a relação entre V_o (tensão de saída) e V_i (tensão de entrada) no domínio da frequência, dada na Equação 2, .

$$H(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} \quad (2)$$

A impedância do circuito é obtida através dos sinais de tensão e corrente medidos, conforme Equação 3, dada em Ohms.

$$Z_T(\omega) = \frac{V_i(\omega)}{I_o(\omega)} \quad [\Omega] \quad (3)$$

A corrente I_o é a corrente de saída do circuito de medição, a qual é calculada através da queda de tensão através de uma impedância de medição (Z_o) de 50 Ω (AGUIAR; TEIXEIRA JUNIOR, 2009). Deste modo tem-se:

$$Z_T(\omega) = 50 \cdot \left(\frac{V_i(\omega)}{V_o(\omega)} \right) \quad (4)$$

Além da amplitude dos sinais medidos, medem-se também o ângulo de fase sendo este a diferença de fase entre a tensão de saída (V_o) e a tensão de entrada (V_i), no caso da relação de transferência de tensão, e da tensão e corrente no caso da impedância terminal. O ângulo de fase permite observar os indícios de mudanças bruscas de variação das propriedades da impedância do transformador, isto é, de característica capacitiva para indutiva ou vice-versa, ou apresentar comportamento constante para o caso de uma resistência. O ponto de transição corresponde ao fenômeno da ressonância, e, em um circuito RLC, ocorrem quando as reatâncias capacitiva (Equação 5) e indutiva (Equação 6) são iguais, e, portanto, originando uma impedância puramente resistiva.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (5)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (6)$$

No transformador, as ressonâncias são causadas pelas características físicas do núcleo e/ou deformações na geometria deste através de deslocamentos axiais ou longitudinais.

Igualando-se a Equação 5 e a Equação 6, tem-se a frequência de ressonância, ou seja:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

A Figura 13 apresenta a simulação de impedâncias resistiva, capacitiva e indutiva em função da frequência. Como pode-se observar, a tendência

crescente da curva de impedância indica que neste trecho o comportamento do circuito RLC é indutivo. Contrariamente, uma tendência decrescente da curva de impedância indica comportamento capacitivo do circuito.

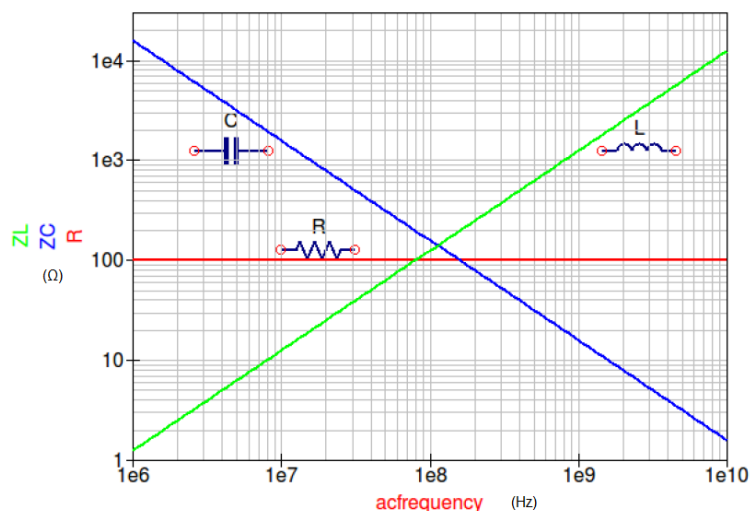


Figura 13. Comportamento das impedâncias resistiva, capacitiva e indutiva em função da frequência.

A Figura 14 mostra o exemplo da magnitude da relação de transferência de um resultado de resposta em frequência realizado em um transformador, com injeção em uma das fases e medição no neutro sendo os enrolamentos ligados em estrela. Desse modo, tem-se a magnitude (a) e o ângulo de fase (b), ambos em função da frequência em gráficos em escalas logarítmicas. Desse modo, pode-se observar característica indutiva do transformador até aproximadamente 500 Hz, ou seja, com magnitude diminuído com o aumento da frequência (tendência inversa da impedância como demonstrado na Figura 13), característica capacitiva de 500 Hz a aproximadamente 7 kHz, com magnitude aumentado com o aumento da frequência, e assim por diante ao longo de todo o espectro de frequência da análise. Os pontos de mudança da curva (picos e vales) são as ressonâncias.

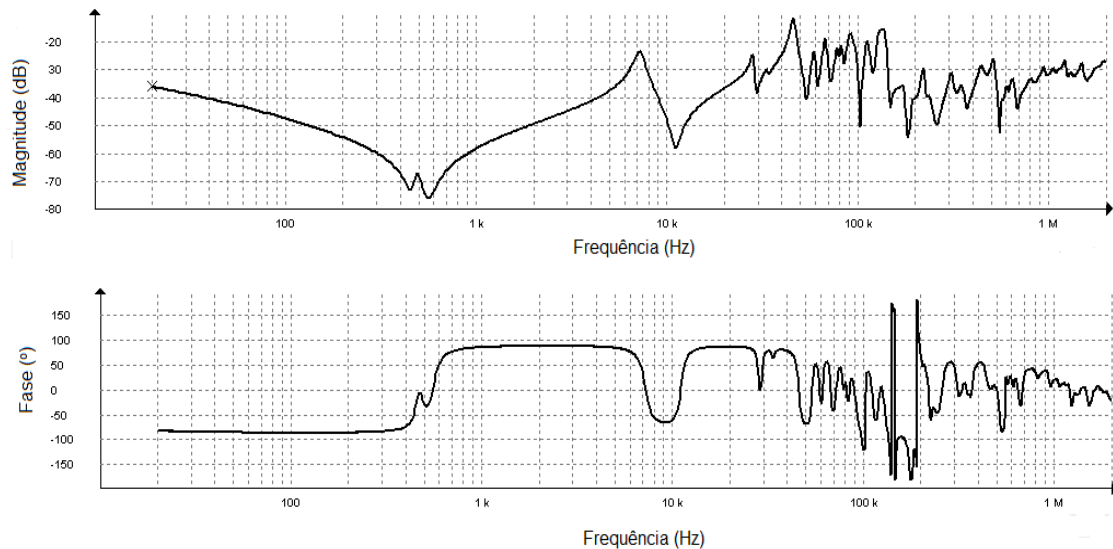


Figura 14. Gráfico da magnitude (a) e ângulo de fase da função transferência de um ensaio de resposta em frequência

Como a análise dos resultados é feita de maneira comparativa, normalmente duas ou mais curvas são plotadas no mesmo gráfico. A Figura 15 apresenta, como exemplo, duas curvas de magnitude da função transferência da tensão de saída pela tensão de entrada em um enrolamento de alta tensão (fase-neutro) realizados em um mesmo transformador, porém em instantes de tempo diferentes. Nota-se que, ao serem apresentadas no mesmo gráfico, existem diferenças da resposta em frequência na região entre 100 Hz a 2 kHz, 20 a 50 kHz e de 100 a 300 kHz. Estas diferenças sugerem que alterações geométricas ocorreram na parte ativa do transformador em algum instante de tempo entre as duas medições. Durante o decorrer deste trabalho, serão comparadas apenas as curvas de magnitude das respostas em frequência.

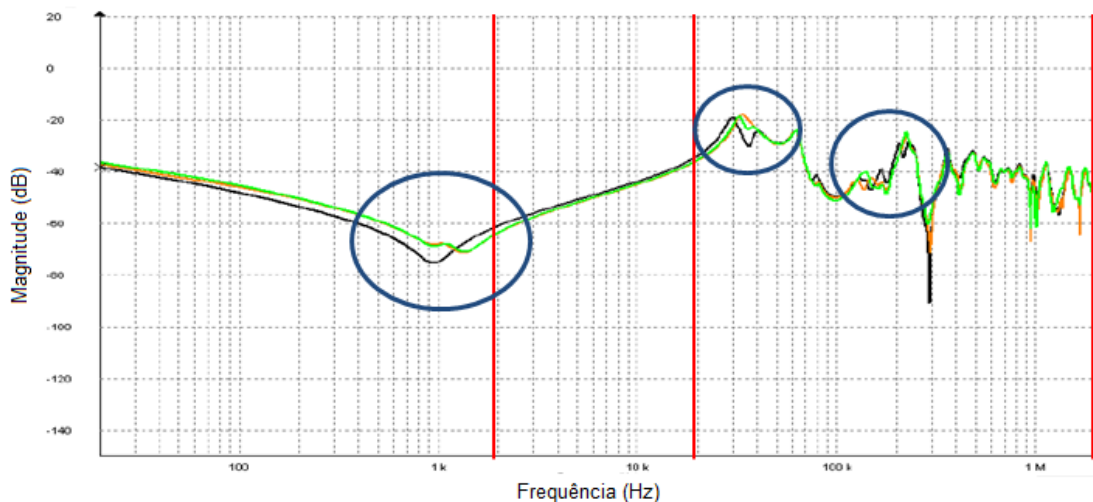


Figura 15. Exemplo de gráfico comparativo entre duas curvas diferentes (realizada em momentos distintos no mesmo equipamento) da função transferência

Visto que a frequência é variada de 20 Hz até 2 MHz, de acordo com a IEC 60076-18, as alterações causadas nas ressonâncias características do transformador podem dividir-se em quatro regiões de análise (Figura 16):

- A região de baixa frequência, até aproximadamente 2 kHz, é determinada principalmente pelo núcleo, ou seja, pelas indutâncias de magnetização do núcleo e capacitâncias para a massa, além da magnetização residual do núcleo.
- A região de média frequência por sua vez, de 2 a 20 kHz, é determinada por interações entre os enrolamentos, ou seja, depende do arranjo e conexões dos enrolamentos (delta, estrela e outros tipos de conexões).
- Nas altas frequências, de 20 kHz a 2 MHz, a influência é dada principalmente pela característica individual de cada enrolamento e conexões internas, ou seja, indutâncias parasitas do enrolamento, capacitâncias série do enrolamento e capacitância dos pontos de terra do enrolamento (WANG et al., 2009), por isso, nessa região a capacitância série é o fator preponderante na determinação da curva de resposta em frequência. Em geral observa-se várias ressonâncias nessa região de estudo.
- À partir de 2 MHz as medidas são influenciadas principalmente por conexões e cabos de medição. Dessa maneira as medidas nessa área

de interesse possuem menor repetibilidade sofrendo influência direta do arranjo de medição, pontos de conexão dos aterramentos e comprimentos das buchas.

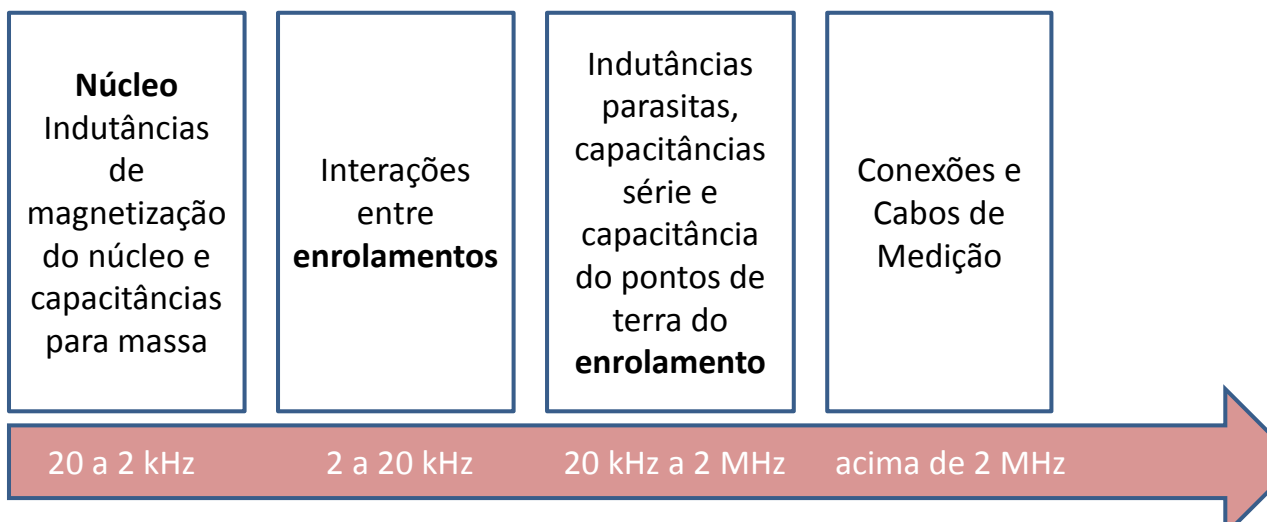


Figura 16. Regiões de análise de resposta em frequência em transformadores

No entanto, para que isso seja corretamente avaliado, as configurações de ensaio, tais como comprimentos dos cabos, equipamentos utilizados (sem desvios significativos de calibração), ligação realizada no transformador, posição do comutador, e outros detalhes devem ser idênticos ou muito próximos entre si. Além de outros detalhes, que nem sempre são tão evidentes, tais como: a direção do sinal injetado que pode causar divergências entre as medidas, uma vez que o deslocamento angular do transformador deve ser levado em conta; o efeito do tipo e temperatura do óleo isolante durante o ensaio (a IEC recomenda variações de temperatura menores que 50 °C); a polarização do transformador através da injeção de sinais DC (em ensaios de medição resistência dos enrolamentos por exemplo); as buchas utilizadas durante os testes, as quais também influenciam significativamente as respostas devido às suas capacitâncias, que necessariamente serão envolvidas na medição (PICHER et al., 2008); dentre outros fatores que, se desconsiderados, podem levar a conclusões errôneas do estado do transformador.

3.3 CIRCUITOS DE TESTE E CONEXÕES

Geralmente nos circuitos de medição de resposta em frequência a tensão é injetada em um terminal do transformador em relação ao terra e a tensão medida à partir do sinal injetado é a referência para o cálculo da resposta em frequência. A resposta ao sinal injetado pode ser tanto um sinal de tensão como um sinal de corrente ao longo da impedância do objeto de teste, no terminal de entrada ou em outro terminal de acordo com a configuração de ensaio, conforme já visto. De acordo com a IEC 60076-18, os circuitos de medição de resposta em frequência (função transferência) podem ser:

- **Início-Final do Enrolamento:** também conhecido como auto-admitância de circuito aberto (IEEE PC57.149/D5, 2012), neste tipo de configuração o sinal é aplicado no início do enrolamento e medido no final do enrolamento, como pode ser observado no esquema representativo da Figura 17. Neste caso, a impedância de magnetização do transformador (e conseqüentemente o núcleo do transformador) é o parâmetro principal característico da resposta em frequência (antes de ocorrer a primeira ressonância). Este teste é facilmente implementado e possibilita examinar cada enrolamento separadamente. Além disso, nesta configuração de ensaio, a fonte de sinal pode ser aplicada no terminal de fase ou terminal de neutro, ou ainda, nos terminais de baixa tensão ou alta tensão, independente do tipo de ligação (delta ou estrela). A Figura 18 apresenta a resposta de um circuito “início-final do enrolamento” com medição nos terminais de alta tensão enquanto a Figura 19 apresenta a mesma configuração, mas nos terminais de baixa tensão do transformador.

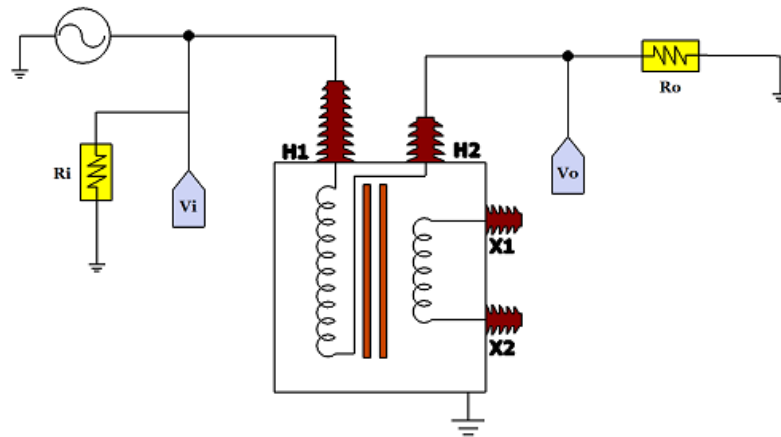


Figura 17. Esquema representativo da configuração de ensaio “Início-Final do Enrolamento”

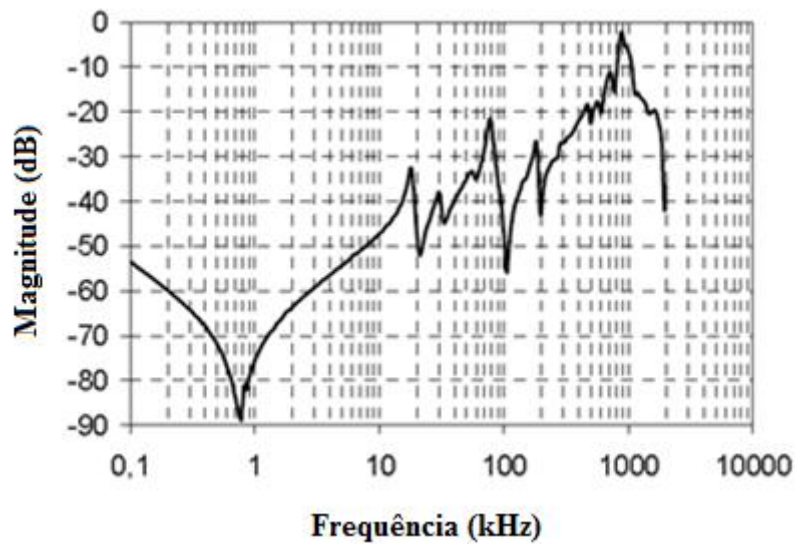


Figura 18. Exemplo de resposta em frequência em terminal de alta tensão na configuração Início-Final do enrolamento (PICHER et al., 2008)

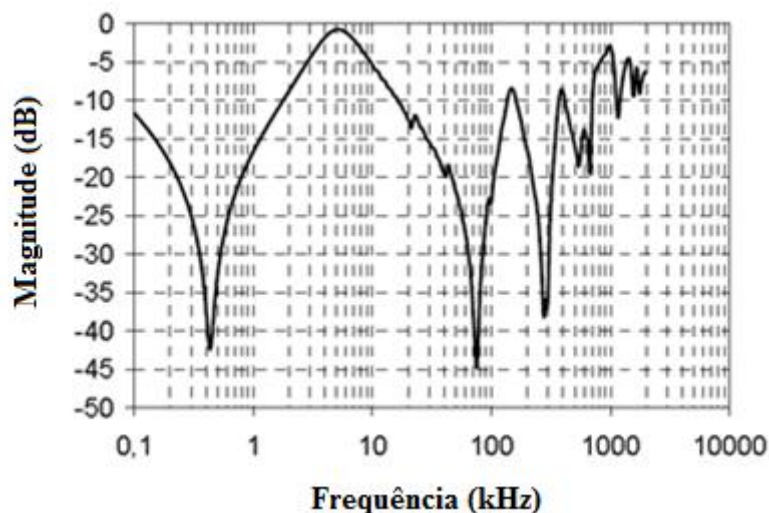


Figura 19. Exemplo de resposta em frequência em terminal de baixa tensão na configuração Início-Final do enrolamento (PICHER et al., 2008)

- Início-Final do Enrolamento com Curto-Circuito:** este tipo de configuração é similar a configuração anterior, mas agora são curto-circuitados os demais terminais do terminal análogo ao qual se está realizando a medição. O sinal normalmente é injetado nos terminais de alta tensão e medido nos terminais de baixa. A Figura 20 mostra a diferença obtida entre duas curvas de função transferência, com e sem a presença de curto-circuito na baixa tensão de um transformador. A intenção do curto-circuito é de eliminar o efeito do núcleo na medição na faixa de 10 a 20 kHz uma vez que a resposta em baixa frequência é caracterizada pela indutância de fuga ao invés das indutância de magnetização.

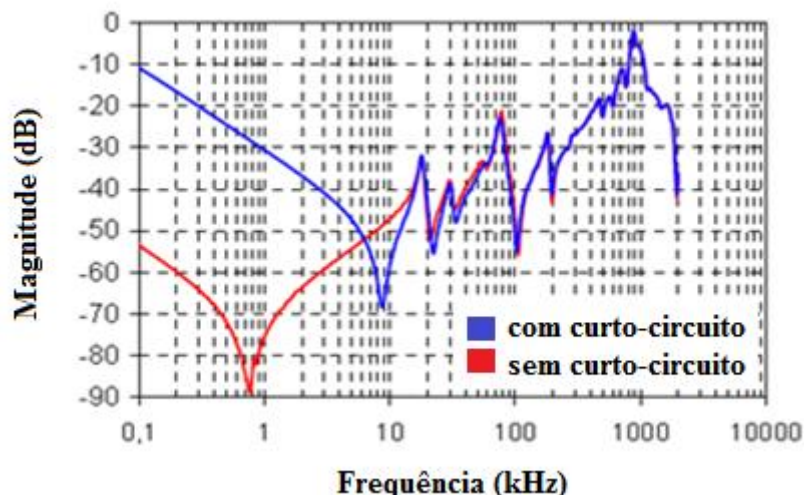


Figura 20. Exemplo de diferença entre medição com e sem curto-circuito na baixa-tensão (PICHER et al., 2008)

- Capacitância Entre-Enrolamentos de Alta Tensão e Baixa Tensão:** o sinal é aplicado no início do enrolamento de um dos terminais de alta tensão (ou baixa) e o sinal é medido no início do enrolamento da respectiva fase de baixa tensão (ou alta). Os demais terminais são mantidos em aberto. Neste caso ocorre uma alta impedância para baixas frequências (<100 Hz), e, portanto a impedância diminui com o aumento da frequência. A Figura 21 demonstra a característica de uma resposta considerando a medição de capacitância entre enrolamento de alta e baixa tensão.

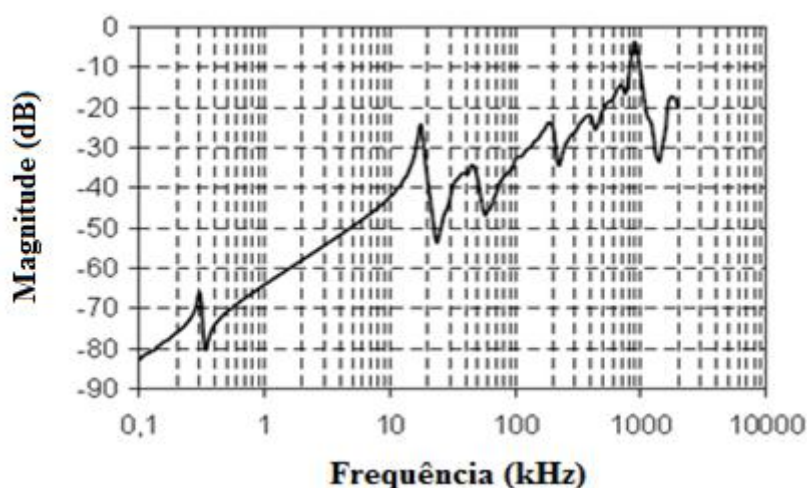


Figura 21. Exemplo de arranjo de medição da capacitância entre enrolamentos AT e BT (PICHER et al., 2008)

- **Indutância Entre-Enrolamentos de Alta Tensão e Baixa Tensão:** a configuração de ensaio neste caso é a mesma do caso anterior, no entanto, o final dos enrolamentos, tanto no qual o sinal é aplicado como no qual o sinal é medido deverão ser aterrados. Nesta configuração a medida em baixa frequência é determinada pela relação de transformação do enrolamento. A Figura 22 apresenta a resposta em frequência na configuração para medição da indutância entre enrolamentos de alta e baixa tensão.

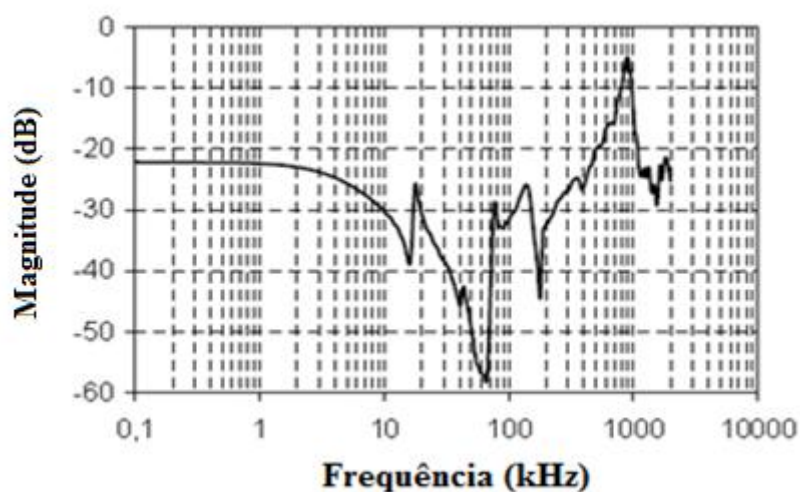


Figura 22. Exemplo de arranjo de medição de indutância entre enrolamentos da AT e da BT (PICHER et al., 2008)

A TABELA 3 (recomendada pela IEC 60076-18) mostra um resumo das configurações básicas de medição possíveis para um transformador trifásico de dois enrolamentos, com ligação estrela nos terminais de alta tensão H0 (neutro), H1, H2 e H3, e delta no terminais de baixa tensão X1, X2 e X3. Nas configurações 1, 2 e 3 são observadas as configurações “início final do enrolamento” para os enrolamentos de alta tensão ligados em estrela, portanto, para que apenas um dos enrolamentos seja analisado de cada vez, as medidas são realizadas entre fase e neutro. Nas configurações 4, 5 e 6 são observadas as configurações “início final do enrolamento” para os enrolamentos de baixa tensão ligados em delta. As configurações 7, 8 e 9 são ligações “início final do enrolamento com curto-circuito”. Nas configurações 10, 11 e 12 são medidas as capacitâncias entre enrolamentos de alta e baixa tensão, e finalmente, nas

configurações 13, 14 e 15 são medidas as indutâncias entre alta e baixa tensão. De maneira geral, para demais tipos de ligações, as configurações são análogas às da Tabela 1, sendo que para enrolamentos em delta os ensaios são entre fases, e para ligações em estrela os enrolamentos são entre fase e neutro.

TABELA 3. CONFIGURAÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO ESTRELA-DELTA DE DOIS ENROLAMENTOS (IEC 60076-18)

Configuração	Fonte e Referência (Vin)	Resposta (Vout)	Terminais Aterrados	Terminais em Curto
1	H1	H0	-	-
2	H2	H0	-	-
3	H3	H0	-	-
4	X1	X2	-	-
5	X2	X3	-	-
6	X3	X1	-	-
7	H1	H0	-	X1-X2-X3
8	H2	H0	-	X1-X2-X3
9	H3	H0	-	X1-X2-X3
10	H1	X1	-	-
11	H2	X2	-	-
12	H3	X3	-	-
13	H1	X1	X2	-
14	H2	X2	X3	-
15	H3	X3	X1	-

3.4 RECOMENDAÇÕES PARA MEDIÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

De acordo com (PICHER et al., 2008) alguns cuidados devem ser tomados para realização de medições envolvendo altas frequências. A principal recomendação é com relação aos circuitos de medição e injeção de sinais. Neste caso os circuitos devem ser separados, com condutores próprios para medição e injeção. Além disso, recomenda-se a utilização de cabos coaxiais de largura de banda adequada para altas frequências (com menor comprimento possível) e impedâncias características dos instrumentos utilizados, normalmente 50 Ω , a fim de evitar reflexões das medidas.

Para se obter uma boa repetibilidade das medições, deve-se sempre utilizar as blindagens dos cabos coaxiais aterradas. Em altas frequências, condutores, isolantes e dispositivos eletrônicos possuem comportamento distinto do apresentado em baixas frequências, visto que elementos parasitas alteram significativamente sua dinâmica. De acordo com a IEC 60076-18, os pontos de aterramento também são muito importantes nas medições envolvendo altas frequências. Por isso, a continuidade dos pontos de aterramento deve ser verificada, bem como a continuidade destes com a blindagem dos cabos coaxiais de medição, além dos pontos de aterramento do transformador como flanges e parafusos.

O número de pontos de uma medição de resposta em frequência, de acordo com a IEC 60076-18 deve ser de pelo menos 200 pontos por década para frequências acima de 100 Hz, além disso, em casos onde as baixas frequências possam ser desprezadas, a faixa das medições em frequência pode ter início à partir de 5 kHz.

De acordo com a IEE PC57 149/D5 ruídos podem ser superpostos a um sinal medido, podendo prejudicar a análise contida nesse sinal. Tais ruídos podem ser introduzidos através de alterações nos circuitos de medição, falta de casamentos de impedância, campos eletromagnéticos, fugas eletrostáticas, além dos cabos e conexões, já mencionados.

Diante disso, nota-se que os ensaios de resposta em frequência, seja pela modalidade de IFRA ou SFRA, são ferramentas muito eficazes para a detecção de defeito no interior de um transformador. No entanto, para que o ensaio seja confiável, ou seja, para que os resultados entre dois ensaios realizados sejam comparativos, resultando em um diagnóstico preciso do estado do transformador, os arranjos de ensaio e a documentação referente a este devem ser cuidadosamente realizados. Assim, durante a realização dos ensaios de SFRA, as configurações e arranjos de ensaio são muito importantes para repetibilidade das medidas. Deve-se manter um histórico de toda a estrutura utilizada durante a realização de uma medida, de modo que não haja alterações nos equipamentos utilizados, comprimentos dos cabos, aterramentos, além das configurações do transformador, tais como buchas,

posições dos comutadores, volume e temperatura do óleo isolante. Além disso, a região de análise na frequência também é importante para confrontar as respostas obtidas (se houverem alterações) com possíveis defeitos no núcleo do transformador, ajudando na tomada de decisões de manutenção e alterações de projeto.

4. ANÁLISE DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA EM TRANSFORMADORES – MÉTODO ON-LINE

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será discutido o método de Análise de Resposta em Frequência aplicado em transformadores energizados. Além de apresentar a evolução do tema encontrado na literatura, será também abordada a metodologia para aplicação de ensaios de Resposta em Frequência com Varredura de Sinais em transformadores energizados, ou simplesmente, SFRA *on-line*.

As técnicas de resposta em frequência apresentadas no Capítulo 3 tem como característica a desenergização do transformador e desconexão deste no sistema elétrico. A partir de agora, os estudos estarão concentrados na proposta de medição de resposta em frequência com o transformador energizado, sendo possível a avaliação do equipamento em tempo real (daí o termo *on-line*), e, portanto sem desligamentos. Essas técnicas de resposta em frequência *on-line* foram apresentadas recentemente em (COFFEEN; MCBRIDE; CANTRELLE, 2008), (COFFEEN et al., 2009), (RYBEL et al., 2009), (SETAYESHMEHR et al., 2009), (BAGHERI et al., 2011), (BEHJAT et al., 2011) e (COFFEEN; MCBRIDGE; KANE, 2011).

Dentro do contexto de medição de FRA *on-line*, existem duas propostas de medições: uma aplicando o método de resposta em frequência ao impulso e outra utilizando a varredura de frequência. O primeiro caso, também conhecido como IFRA *on-line*, é utilizado em (COFFEEN; MCBRIDE; CANTRELLE, 2008) e (COFFEEN et al., 2009) enquanto que o método de varredura, o SFRA *on-line*, é aplicado em (MARTINS, 2007), (RYBEL et al., 2009), (SETAYESHMEHR et al., 2009) e (BAGHERI et al., 2011).

Na análise de resposta em frequência sob impulso segundo (COFFEEN; MCBRIDE; CANTRELLE, 2008), a fonte de excitação das várias frequências para formar o espectro é fornecida pelos transientes de alta frequência que ocorrem periodicamente no sistema elétrico de potência. Estes transientes são

gerados por descargas atmosféricas ou podem também ser ocasionados por manobras de seccionadoras e disjuntores. As ondas de tensão impulsivas são medidas no domínio do tempo através de divisores de alta tensão de banda larga acoplados aos terminais dos enrolamentos. Outra solução é a utilização de *taps* capacitivos das buchas de alta tensão do transformador e construção de divisores de tensão de banda larga, evitando-se a compra e alocação de divisores de alta tensão na subestação. Da mesma maneira, deve-se medir as ondas de corrente de impulso que circulam no enrolamento para compor o espectro de frequência, emulando assim o ensaio de FRA modalidade impulso. Outra maneira é medir a corrente é através de TC (transformador de corrente) no terminal de neutro do enrolamento.

Outra forma de medição *on-line* é a modalidade de varredura de frequências, conhecida como SFRA *on-line*, que é representado pelos trabalhos de (RYBEL et al., 2009), (SETAYESHMEHR et al., 2009) e (BEHJAT et al., 2011), em que ocorre a injeção de ondas senoidais com frequência variável, através de um gerador de funções ou um analisador de redes, aplicadas no *tap* capacitivo de buchas condensivas, ou, alternativamente em um sensor capacitivo não invasivo, conforme Setayeshmehr et al. (2009), com amplificação, de acordo com (RYBEL et al., 2009), ou sem amplificação. A tensão resultante na frequência variável pode ser medida no neutro do enrolamento através de um TC, conforme (SETAYESHMEHR et al., 2009), ou ainda, no *tap* de outra fase, de acordo com (BAGHERI et al., 2011). Obtém-se, portanto, dois sinais, um medido no *tap* e o outro medido no neutro (fase-neutro) ou fase adjacente (fase-fase). Através destes é possível calcular a função de transferência ou ainda a impedância terminal do enrolamento do transformador.

Tanto para o caso de IFRA como para o de SFRA, aplicado em transformadores energizados, os estudos ainda estão em fase de desenvolvimento, visto que ambas as técnicas de diagnóstico *on-line* são recentes.

Conforme comentado anteriormente, a técnica de SFRA possui a vantagem de utilizar menor quantidade de equipamentos em relação à técnica

IFRA, ocorrendo também na modalidade *on-line*. Além disso, para realização de estudos iniciais de IFRA seria necessário a introdução de divisores banda larga para medição da tensão de entrada na alta tensão do transformador, mas fundamentalmente, a maior desvantagem do IFRA *on-line* é a dificuldade de validação do método em laboratório, visto que para isso seria necessária a aplicação de impulsos atmosféricos com o transformador energizado, situação crítica para os equipamentos envolvidos (gerador de impulso, fonte AC e até mesmo o transformador sob teste) e de difícil implementação. Portanto, o método escolhido para estudos com o transformador energizado será o de SFRA *on-line*, o qual será abordado nas seções subsequentes.

4.2 SFRA ON-LINE

Para realização de ensaios de SFRA com o transformador energizado é necessário o estudo prévio do equipamento o qual se deseja realizar os testes. Cada projeto de transformador é único e, portanto, para cada caso deve se ter um estudo diferente, no entanto, de forma genérica pode-se dizer que a metodologia para realização de ensaios de SFRA *on-line* segue as seguintes etapas:

1. Escolha do melhor método (injeção e medição dos sinais através dos *taps* das buchas condensivas) para acesso ao núcleo do transformador, sem influência das altas tensões dos terminais do transformador. Neste trabalho, o método utilizado será a utilização dos *taps* capacitivos das buchas condensivas, com injeção de sinais de frequência variável.
2. Seleção da melhor configuração para injeção dos sinais e medição destes e da resposta obtida. Isto é devido ao fato do transformador possuir pelo menos duas entradas e duas saídas, sendo que nos ensaios de resposta em frequência pelo menos uma entrada e uma saída devem ser definidas. Na seção 4.3 são apresentadas as possíveis configurações para um transformador, enquanto na seção 5.4 as configurações possíveis são aplicadas a um estudo de caso.

3. Implementação de um circuito de proteção, uma vez que todo o ensaio é realizado com o transformador energizado. Este tipo de circuito é necessário para que seja possível (mesmo que o método e a configuração escolhida tenham reduzido consideravelmente os níveis de tensão) o acesso e a conexão segura dos equipamentos eletrônicos utilizados para realização de ensaios de resposta em frequência. A apresentação da metodologia para projeto do filtro é apresentada através do estudo de caso discutido na seção 5.6.

4. Caracterização dos parâmetros das buchas do transformador. Isto é necessário para o correto projeto do circuito de proteção, visto que os sinais serão injetados através das buchas, logo, o acoplamento entre o circuito de proteção e as respectivas capacitâncias da bucha devem ser analisadas, bem como sua influência durante a realização dos ensaios de resposta em frequência. Os aspectos teóricos da caracterização de buchas são apresentados na seção 4.5 e sua aplicação é realizada no estudo de caso apresentado na seção 5.5.

5. Comissionamento do conjunto. Uma vez projetado o circuito de proteção, o comissionamento do conjunto, com transformador energizado, formado pelo sistema de medição, no qual estão inclusos: transformador, buchas do transformador, circuitos de proteção, cabos, conexões e equipamentos de medição.

6. Realização dos ensaios. Após as etapas anteriores o sistema estará apto para operação em sistemas energizados e todo o arranjo de ensaio deverá ser fixo, sem alterações de cabos ou conexões, por exemplo, com exceção dos circuitos externos (cargas) conectados aos terminais (alta e baixa tensão) do transformador, conforme será exemplificado na seção 4.6 e melhor explorado nas seções 5.8 e 5.9. Os resultados dos ensaios de resposta em frequência realizados com o transformador energizado e com o novo esquema de ensaio serão considerados como sendo as novas assinaturas do transformador e poderão ser confrontados com ensaios realizados ao longo da vida útil do transformador. Os resultados comparativos obtidos podem ser utilizados como base para tomada de decisões, tais como desligamento para manutenção e investigação através de ensaios *off-line*.

A Figura 23 mostra um fluxograma básico da metodologia de SFRA *on-line* para aplicação em um transformador de potência qualquer. Ao final do processo, o transformador sob estudo estará apto a operar com o sistema energizado. Como estudo complementar, foram realizadas ainda variações das condições de operação do equipamento energizado, tais como variação das cargas alimentadas pelo transformador, conforme será discutido no Capítulo 5.

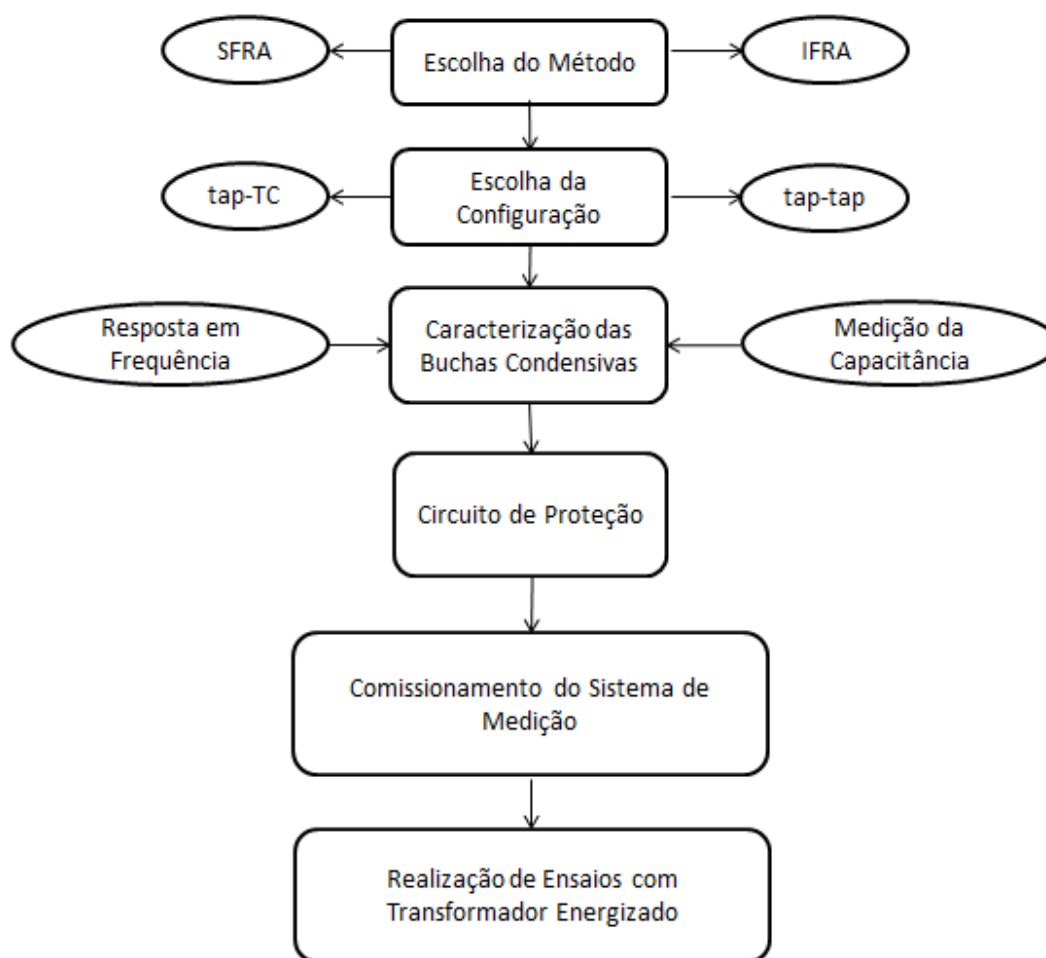


Figura 23. Metodologia para ensaios de SFRA *on-line*

4.3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA ATRAVÉS DE SINAIS INJETADOS PELO TAP CAPACITIVO

Uma vez definido o método de ensaio *on-line*, a próxima etapa consiste em determinar o melhor tipo de arranjo de teste, de modo que o diagnóstico seja eficiente, mas que não ocorram interferências no funcionamento do transformador nem envolva riscos a outros equipamentos e aos técnicos envolvidos no ensaio.

Como o acesso ao núcleo do transformador através dos terminais de alta tensão é possível somente em caso de desenergização, algumas abordagens foram propostas na literatura, utilizando alternativamente a injeção de sinais através de *tap* capacitivos de buchas condensivas. As configurações possíveis para realização de ensaios de SFRA *on-line* são realizadas entre fases e entre fase e neutro.

De acordo com (BAGHERI et al., 2011), para transformadores ligados em delta nos terminais de alta tensão a configuração de ensaio proposta é a injeção de sinais no *tap* de uma das fases com medição no *tap* de outra fase. Se o transformador possuir ligação em estrela os sinais são injetados no *tap* de uma das fases e medidos no *tap* do neutro, ou, alternativamente, em um TC instalado diretamente no neutro, de acordo com Setayeshmehr et al. (2009). Geralmente para aplicações em alta frequência utiliza-se Bobinas de *Rogowski* de alta corrente e alta frequência, permitindo assim a medida da corrente impulsiva no domínio do tempo, e em seguida convertidos para o domínio da frequência. Essas configurações de ensaio são ilustradas na Figura 24 e Figura 25.

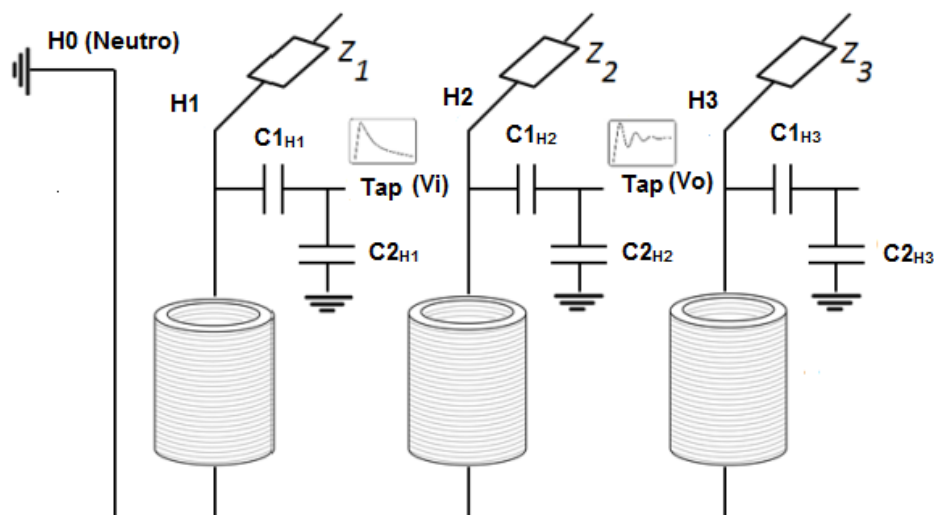


Figura 24. Resposta em frequência injetando sinal no *tap* e medição da tensão de saída em outro *tap* (BAGHERI et al., 2011)

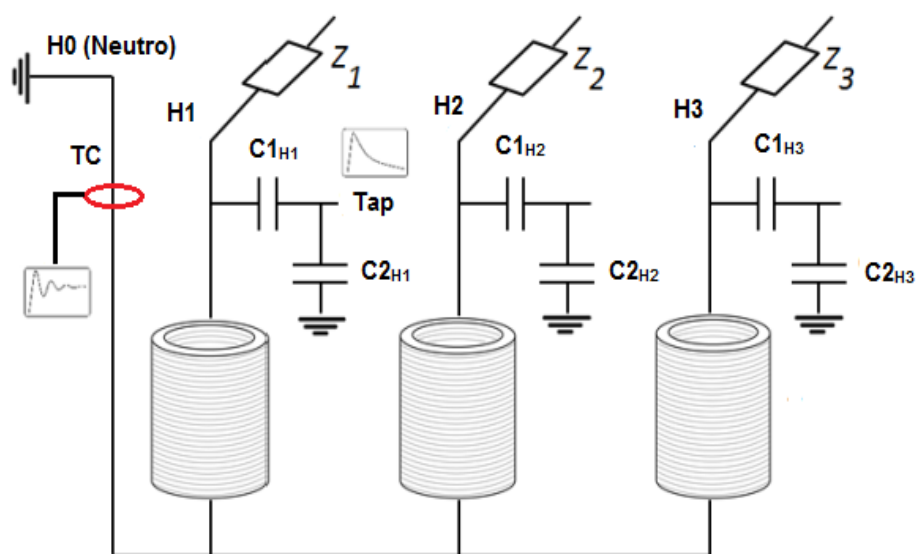


Figura 25. Resposta em frequência injetando sinal no *tap* e medição da corrente de saída no aterramento do neutro

Na Figura 24 o sinal de referência é injetado no *tap* de uma bucha e o sinal de saída é medido também pelo *tap* da bucha de outro terminal. Enquanto que no circuito da Figura 25, o sinal é injetado no *tap* da bucha de um terminal e o sinal de saída é medido através de uma Bobina de *Rogowski* no terminal de

neutro ligado ao terra, visto que o transformador sob análise possui bucha de neutro acessível e aterrada.

Com objetivo de determinar a melhor configuração, ainda, serão apresentadas comparações entre as medidas de SFRA nas configurações normatizadas, de acordo com as recomendações da (IEC 60076-18, 2012) e (IEEE PC57.149/D5, 2012), e configurações utilizadas em (BAGHERI et al., 2011), (MARTINS, 2007), (RYBEL et al., 2009). No entanto, as comparações foram realizadas com o transformador desenergizado, visto que na literatura não são apontadas as características das diferentes configurações nem a justificativa para escolha destas. Desta maneira, o fato do transformador estar desenergizado permitirá a obtenção de resultados sem a influência das altas tensões durante os testes. Essa etapa é importante para definição das melhores configurações, as quais serão utilizadas com o transformador energizado.

A TABELA 4 apresenta as configurações de ensaio de SFRA utilizando o *tap* capacitivo das buchas de alta tensão, implementadas com objetivo de obter-se configurações aplicáveis à transformadores energizados, além da Configuração 16, entre fases, o qual não é recomendada pelas normas à cerca do tema. A numeração das configurações está em sequência com a TABELA 3. Nesta tabela, a medição (V_{out}) com TC significa a utilização de bobina de Rogowski e medição (V_{out}) com TAP significa medição direta realizada através da impedância interna do instrumento de medição na derivação capacitiva (ver Figura 24 e Figura 25).

A Configuração 16 foi realizada com intuito de verificar a influência dos enrolamentos H1 e H2, em estrela e entre fases para futura comparação com as medidas entre fases, levando-se em conta os *taps* capacitivos.

As Configurações 17 e 19, ou seja, injeção de sinais no tap de H1 com medição em H0 através de Bobina de *Rogowski* (ganho de 2,5 V/A em 50 Ω) e injeção de sinais no tap de H1 com medição no tap de H2 (ou poderia ser de quaisquer outras fases), serão melhor discutidas na seção 5.4, onde os resultados das medições da TABELA 4 serão apresentados e analisados.

A configuração 18, realizada entre *taps*, será utilizada para comparação com a Configuração 17 e Configuração 1, apresentada na Tabela 3 da seção 3.3, levando-se em conta medidas entre fase e neutro.

TABELA 4. CONFIGURAÇÕES DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA REALIZADAS NO TRANSFORMADOR SOB ENSAIO

Configuração	Fonte e Referência (V_{in})	Resposta (V_{out})	Terminais Aterrados	Terminais em Curto
16	H1	H2	H0	-
17	TAP H1	TC (2,5 V/A) em H0	H0	-
18	TAP H1	TAP H0	H0	-
19	TAP H1	TAP H2	H0	-

4.4 CIRCUITO DE PROTEÇÃO

Na seção anterior foram vistas as injeções de sinais através dos *taps* de buchas com o transformador ainda desenergizado. Além disso, foram definidas duas configurações principais para ensaios desse tipo. No entanto, para que seja possível a injeção de sinais através dos *taps*, visto que altas tensões surgem quando estes estão desaterrados (conforme visto no Capítulo 2), é necessária ainda a inclusão de uma impedância Z_p em paralelo com a capacitância C_2 da bucha, de acordo com a Figura 26, de forma a reduzir a tensão na derivação capacitiva, não submetendo os equipamentos acoplados nesse ponto ao potencial elevado.

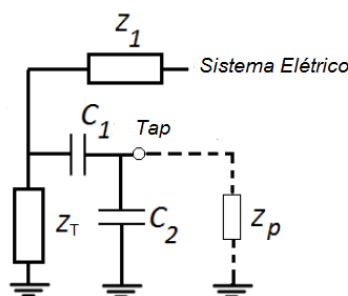


Figura 26. Impedância Z_p introduzida em paralelo com a capacitância C_2 da bucha (BAGHERI et al., 2011)

A Equação 8 apresenta a relação entre a tensão de fase e a tensão no *tap* com a introdução da impedância paralela Z_p . Deste modo a tensão no *tap* é dada por:

$$V_{tap} = \frac{Z_p // \frac{1}{j\omega C_2}}{Z_p // \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_1}} V_{fase} \quad (8)$$

A impedância Z_p é, portanto, utilizada como um circuito de proteção, onde a atenuação do sinal depende do valor dessa impedância. No entanto, esta não deve ser utilizada arbitrariamente apenas com base na queda de tensão, mas também com relação ao seu comportamento frente à banda de frequência de ensaio.

A faixa de frequência de ensaios de SFRA varia de alguns Hertz até alguns Megahertz, dependendo da recomendação seguida. A IEC cita, que para ensaios onde a baixa frequência pode ser desprezada, os ensaios podem ser realizados à partir de 5 kHz. Em ensaios com o transformador energizado essa faixa de análise é restringida. Em (MARTINS, 2007) a faixa de frequência foi de 1 kHz a 3 MHz, à partir da análise de um banco de dados de transformadores, mostrando que para frequências abaixo de 1 kHz não existem ressonâncias significativas.

Em (RYBEL et al., 2009) a faixa de frequência foi de 200 kHz a 2,5 MHz devido as limitações de largura de banda do filtro utilizado. Em outros trabalhos a faixa de frequência inicial variou entre 1 a 10 kHz. Na faixa de frequência abaixo de 1 kHz, como visto anteriormente, o comportamento da curva de função transferência é dado, principalmente, em função do núcleo do transformador. Apesar desta ser uma região de análise importante do ponto de vista de projeto, mas do ponto de vista de comparação histórica, no entanto, não é fundamental, visto que o núcleo não possui grandes deformações mecânicas ao longo da vida útil do transformador, ao contrário dos enrolamentos conforme abordado no Capítulo 2.

Deste modo, a banda de frequência indicada para ensaios *on-line* é da faixa de 1 kHz a 2 MHz, portanto, o circuito de proteção deve também atuar

como um filtro. Esse filtro pode ser do tipo passa-faixa, onde os sinais de 60 Hz e eventualmente seus múltiplos ímpares (harmônicas) provenientes do sistema energizado serão rejeitados, e também as altas frequências que podem ocorrer em medidas realizadas em campo. O projeto de cada filtro depende do sistema a qual este será inserido, de modo que seja levada em conta a suportabilidade dielétrica dos componentes envolvidos. No capítulo seguinte serão apresentados resultados da implementação de um circuito de proteção aplicado ao transformador objeto de estudo.

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os circuitos esquemáticos com a inclusão do sistema de proteção nas configurações fase-neutro e fase-fase com o transformador energizado.

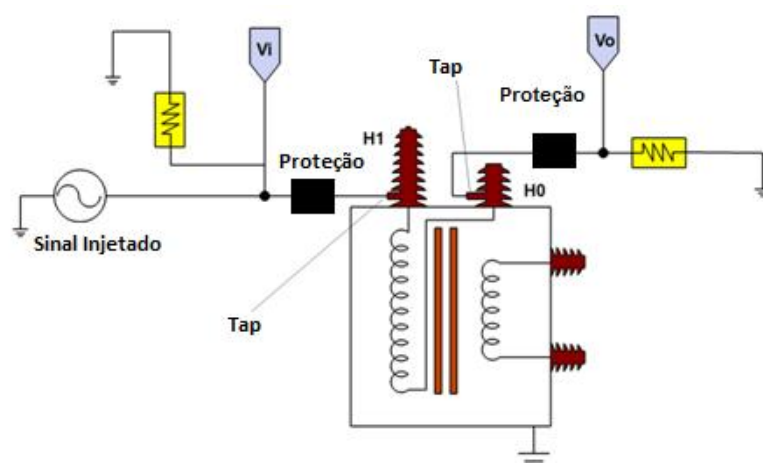


Figura 27. Arranjo de medição de resposta em frequência do transformador energizado *tap a tap*

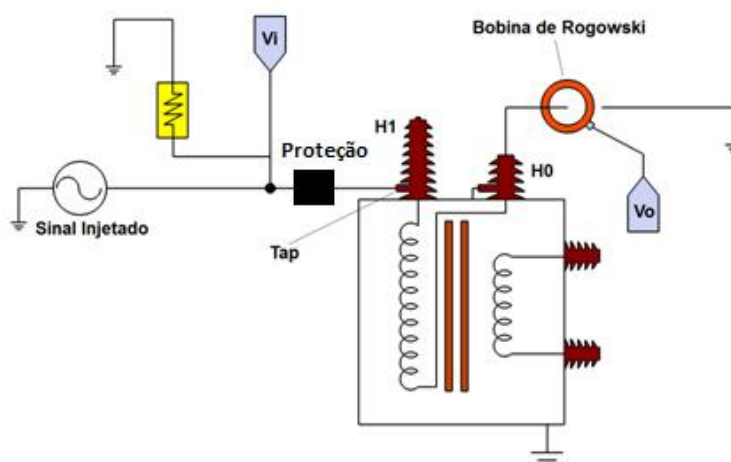


Figura 28. Arranjo de medição de resposta em frequência do transformador energizado *tap a TC*

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BUCHAS

Uma vez que os ensaios *on-line* utilizam os *taps* para injeção dos sinais, e parte das alterações nas curvas de função transferência são decorrentes da inserção desses elementos capacitivos, torna-se necessária a caracterização das buchas envolvidas nas medições, ou, de pelo menos uma delas, caso as demais sejam da mesma família, para verificar suas ressonâncias características, com intuito de mensurar a influência dessas nos ensaios e definir a faixa de frequência em que as ressonâncias ocorrem. Além disso, a caracterização das buchas é necessária para o correto projeto dos filtros de proteção uma vez que o dimensionamento dos componentes é realizado com base nos valores de tensão e corrente do sistema completo.

O valor das capacitâncias C1 e C2 da bucha (ver Figura 9), portanto, são dados importantes para a caracterização desta, pois através delas pode-se determinar a relação do divisor capacitivo formado. Os valores de capacitância de buchas, normalmente são informados pelo fabricante e podem ser obtidos nos relatórios de ensaio de tipo. No entanto, muitas vezes esses valores apresentam diferenças do valor real medido, dependendo do tempo de vida das buchas, ou até mesmo da confiabilidade dos resultados declarados pelo fabricante, fazendo-se necessário a medição desses elementos.

Para determinação das capacitâncias C1 e C2 de buchas utilizam-se, atualmente, pontes de medição eletrônica de capacitância destinadas para esta finalidade. A medição de cada uma das capacitâncias é realizada separadamente. A capacitância C1 é determinada através da aplicação de tensão alternada no terminal de alta tensão (HV) e medição da baixa tensão (LV) e corrente gerada (I_H) no *tap* capacitivo. A Figura 29 apresenta o circuito básico de medição da capacitância C1.

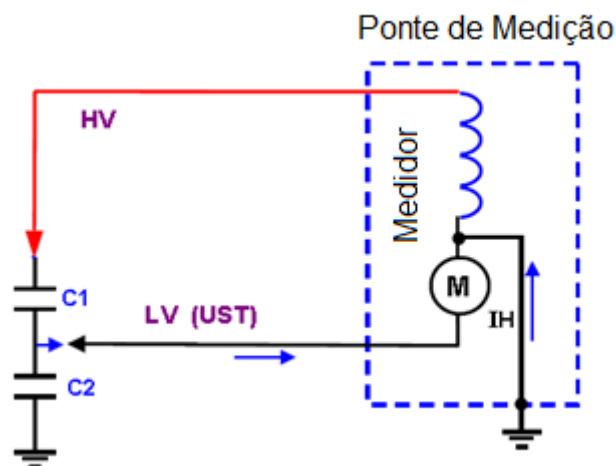


Figura 29. Circuito de medição da capacitância C1 de buchas

A capacitância C2, por sua vez, é determinada através da aplicação de tensão no *tap* capacitivo e medição da corrente total diretamente através do terra como mostra a Figura 30.

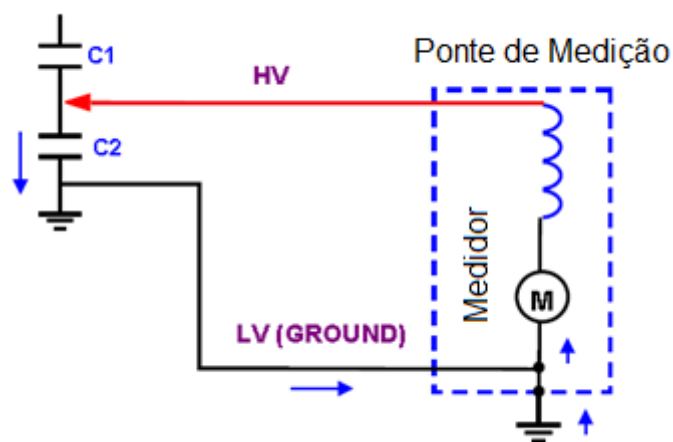


Figura 30. Circuito de medição da capacitância C2 da bucha

Em termos de resposta em frequência, além das capacitâncias principais, elementos resistivos e indutivos são verificados no interior desses tipos de buchas, sendo vistas, portanto, como um circuito RLC série. Dessa maneira a análise em frequência visa a determinação das ressonâncias

características de cada ramo da bucha, ou seja, ramo contendo a capacitância C1 e ramo contendo a capacitância C2.

Para caracterização de C1, é realizada a resposta em frequência apenas do trecho compreendendo a capacitância principal da bucha, da mesma maneira descrita para medição da capacitância, ou seja, o sinal é injetado no terminal de alta tensão e sua resposta medida no *tap* capacitivo. A resposta obtida é confrontada com uma simulação (nesta dissertação foi utilizado o software QUCS – *Quite Universal Circuit Simulator* conforme será apresentado na seção 5.4) RLC série em que a capacitância C é medida, enquanto L é calculada através da Equação 9, visto que a frequência de ressonância f_r também é obtida através da resposta em frequência medida. A resistência R é então variada (através da varredura de valores) de modo a se obter o mesmo ponto de ressonância da curva medida.

$$L = \frac{1}{C.(2\pi f_r)^2} \quad (9)$$

Do mesmo modo, procede-se para caracterização de C2, com a diferença que neste caso a injeção de sinal ocorre pela *tap* e a medição é realizada através do flange aterrado.

De posse das curvas de resposta em frequência da bucha, tanto de C1 como de C2, pode-se verificar a região de ocorrência das ressonâncias características que podem ou não alterar a resposta do transformador, que é o principal alvo das análises. Além da determinação da tensão de saída formada pelo divisor capacitivo da bucha.

Para melhor exemplificar a caracterização de uma bucha, ou seja, a determinação de seus parâmetros R, L e C e sua frequência de ressonância, a metodologia descrita acima será aplicada à um caso específico, apresentado na seção 5.4.

4.6 INFLUÊNCIA DE CARGAS LIGADAS AO SISTEMA

Durante os ensaios de resposta em frequência *on-line* as impedâncias externas conectadas ao transformador também devem ser levadas em consideração. De acordo com a norma IEC, durante a realização dos ensaios *off-line* o transformador deve ser desconectado do sistema. Contudo, em (SOYSAL, 1993), foram realizados estudos variando-se a carga de um transformador de distribuição delta-estrela de 75 kVA, ainda desenergizado, em quatro condições: sem carga, meia carga, carga total e em curto circuito. Neste caso, pode-se observar na Figura 31, que as diferenças são observadas abaixo de 100 kHz, mostrando que a variação da carga apresenta diferenças predominantes envolvendo o núcleo do transformador. Em (SETAYESHMEHR et al., 2009) também foram comparadas as diferenças de função transferência em um transformador de distribuição de 100 kVA desenergizado com secundário em aberto e em curto-circuito, conforme apresentado na Figura 32. Neste caso houveram diferenças acentuadas até 100 kHz e pequenas diferenças à partir dessa frequência.

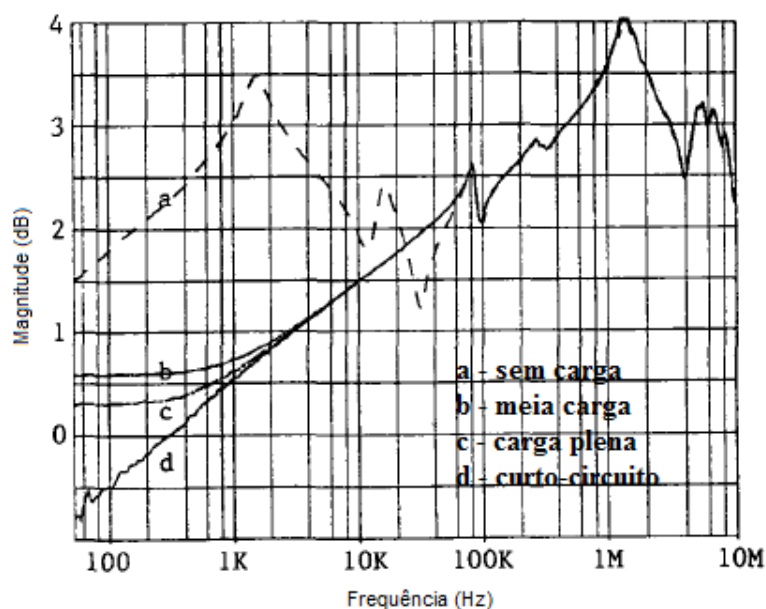


Figura 31. Efeito da variação da carga no ensaio de resposta em frequência. FONTE: (SOYSAL, 1993)

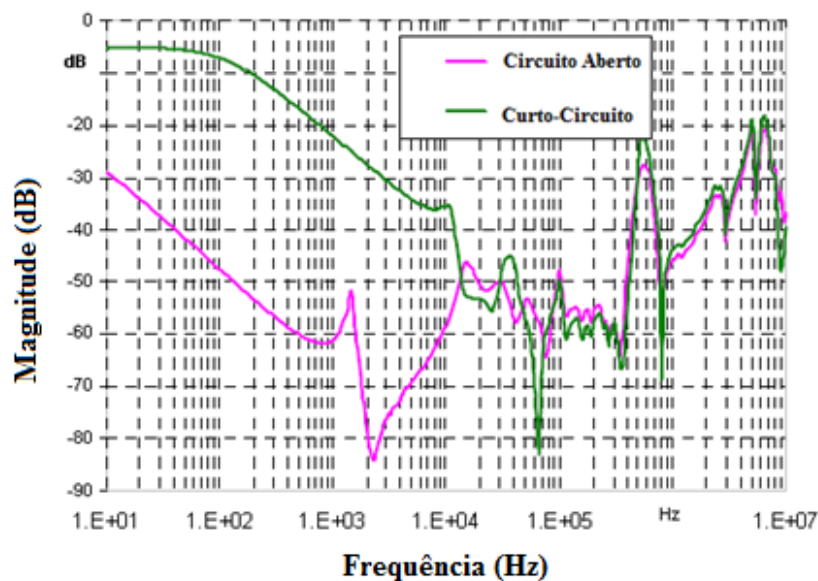


Figura 32. Efeito da variação da carga no ensaio de resposta em frequência. FONTE:
(SETAYESHMEHR et al., 2009)

Nota-se que os estudos apresentados, considerando variações de carga em um transformador, foram aplicados somente em casos *off-line*. A literatura, no entanto, não apresenta estudos de variações de carga aplicados à transformadores energizados, variando o sistema com alterações da impedância equivalente. No capítulo seguinte são apresentados estudos considerando a diferenças de cargas no transformador sob ensaio (*on-line*) e considerações à cerca do tema.

A complexidade do tema envolvendo medições *on-line* está no fato de que durante a realização dos testes o transformador encontra-se energizado, e, conseqüentemente, ruídos tais como interferências eletromagnéticas, e componentes harmônicas, não presentes em uma medição *off-line*, afetam o resultado final das respostas. Além disso, a atenuação do circuito devido à inclusão dos divisores capacitivos formados pelas capacitâncias das buchas promovem uma redução do sinal e conseqüente aumento do ruído presentes nas medições. Tendo em vista a limitação de análises em baixa frequência, somando-se a isso a baixa relação sinal-ruído das medidas *on-line* fazem com que a região de análise nesses casos seja restringida a medições à partir de pelo menos 1 kHz. Finalmente, o estudo de variação das cargas, o qual ainda não tem sido abordado, pode ser importante para consolidar a ferramenta de SFRA *on-line*, fazendo-se necessários novos estudos envolvendo tal condição.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será desenvolvido um estudo de caso para aplicação da ferramenta de SFRA *on-line*, apresentada no Capítulo 4. Para tanto será realizado ensaios de resposta em frequência pelo método normatizado (Seção 5.3), para posterior comparação com ensaios envolvendo os *taps* capacitivos das buchas de alta tensão (Seção 5.4). Uma vez verificada a validade do segundo caso, será realizada a caracterização das buchas condensivas de alta tensão (Seção 5.5), visto que esta análise é importante para o projeto do circuito de proteção, o qual também será visto em detalhes (Seção 5.6). Finalmente, após elaboração do circuito completo de medição e proteção (*set up*) será apresentado o circuito completo de ensaio, considerando o transformador instalado em uma subestação com suas respectivas conexões e interações com o sistema (Seção 5.7). Com objetivo de verificar as diferentes respostas obtidas com o transformador ligado ao sistema, foram feitas ainda duas análises (baseadas nas escolhas das configurações da Seção 5.4), para verificação das particularidades de cada uma e análise da melhor configuração a ser aplicada em um transformador energizado, bem como suas possíveis variações de cargas inerentes à um sistema dinâmico elétrico.

5.2 OBJETO DE ESTUDO

A técnica de resposta em frequência apresentada nos capítulos anteriores tem como característica ser uma ferramenta de análise comparativa, ou seja, os resultados obtidos em um único ensaio não são suficientes para um diagnóstico adequado do transformador. É necessário o acompanhamento do histórico do equipamento, desde sua concepção em fábrica, instalação na subestação (pós-transporte) e manutenção ao longo da vida útil do transformador.

Para análise de SFRA *on-line* foi escolhido como objeto de estudo um transformador de 6 MVA de 72 kV – 6,9 kV, fabricado em 1983, tipo de ligação estrela (com neutro acessível) na alta tensão e delta na baixa tensão, com 33 posições de comutador sob carga (OLTC) e 5 posições de comutador à vazio (DETC), instalado na subestação dos Institutos LACTEC, designado como T-2. A Figura 33 ilustra o transformador objeto de teste, enquanto que o diagrama unifilar da Figura 77 (Anexo 1) mostra sua ligação na subestação.



Figura 33. Transformador de 6 MVA utilizado nos ensaios de SFRA

O instrumento de medição utilizado nos ensaios é um equipamento comercial, próprio para ensaios de SFRA, fabricante Megger™, tipo FRAX 101, conforme Figura 34, que atende as recomendações da IEC, com tensão de saída de 20 V (pico a pico), taxa de amostragem de 100 MS/s e seus respectivos cabos e conexões.

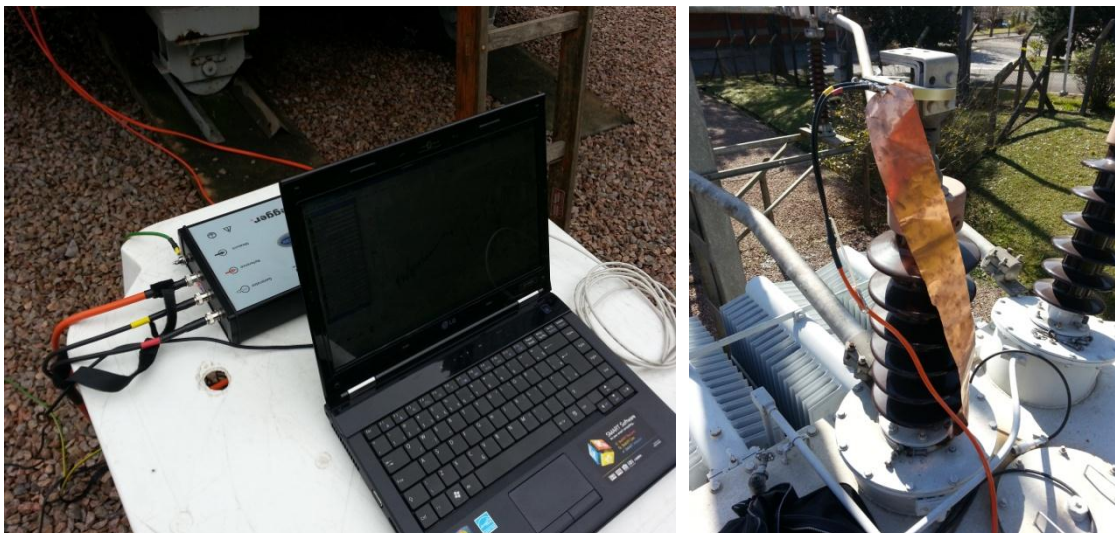


Figura 34. (a) Hardware e Software do equipamento FRAX 101 e (b) cabos e conexões utilizados na medição de SFRA

5.3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA – MÉTODO NORMALIZADO

Primeiramente foram realizadas medições da função transferência do transformador desenergizado utilizando as técnicas normalizadas de SFRA, de acordo com a IEC e IEEE, com o objetivo de levantar a resposta característica desse transformador. As configurações utilizadas estão de acordo com a TABELA 3. Além disso, as posições do comutador sob carga e do comutador à vazio foram as de número 1, com objetivo realizar o ensaio em todo enrolamento do transformador.

Como o transformador não possui histórico de análise de resposta em frequência, as curvas obtidas neste ensaio podem ser consideradas como as impressões digitais desse transformador. Os resultados são apresentados no Apêndice 1.

5.4 RESULTADOS DE ENSAIOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA ATRAVÉS DE SINAIS INJETADOS PELO TAP CAPACITIVO

Para validação das medidas propostas na Figura 24 e Figura 25, apresentadas no Capítulo 4, e escolha de arranjos adequados para realização dos testes *on-line*, conforme citado anteriormente, foram realizadas medidas de resposta em frequência com injeção dos sinais através dos *taps* das buchas de alta tensão do transformador sob análise. Ou seja, o propósito desta fase do estudo é evidenciar a influência do transformador (parte ativa) nos ensaios considerando os *taps*, verificando a influência das capacitâncias das buchas na medição. Nesta etapa os ensaios foram realizados com o transformador ainda desenergizado, evitando-se assim a influência das altas tensões e suas consequências.

As configurações, de acordo com a TABELA 4, apresentada na seção 4.3, foram basicamente divididas em dois casos: medidas fase-neutro, ou seja, Configurações 17 e 18, que serão confrontadas com a Configuração 1 (entre H1 e H0), enquanto a Configuração 19 será confrontada com uma nova medida realizada, Configuração 16, ambas fase-fase, não indicada na TABELA 3 visto que esta não faz parte das recomendações da IEC e IEEE.

A configuração 17 mostra efeitos tanto da capacitância da bucha H1 como do enrolamento H1-H0, como pode ser observado na Figura 35, onde a curva apresenta atenuação do sinal e deslocamento das ressonâncias em relação à frequência, além do comportamento tipicamente capacitivo até aproximadamente 8 kHz, enquanto na Configuração 1 (Figura 62) há uma resposta característica envolvendo o núcleo do transformador em aproximadamente 500 Hz. Contudo, à partir de 2 kHz as curvas possuem respostas com ressonâncias similares, deflagrando a validade das medidas realizadas através do *tap*, a comparação entre os dois resultados é apresentado na Figura 36. A Configuração 18, utilizando o *tap* de H0 apresentou relação sinal/ruído baixa, e, portanto, inadequada para a medição.

A Configuração 16, por sua vez, não foi realizada utilizando nenhum dos *taps*, e não é definida como configuração de ensaio sugerida pelas normas

para um transformador em estrela, mas é importante para definição da característica do enrolamento H1-H2, ou seja, fase-fase. A Configuração 19 refere-se a injeção de sinais e medição de referência no *tap* H1 e medição da resposta no *tap* H2, e, portanto ambas medidas podem ser comparadas. Nota-se uma atenuação do sinal da Configuração 19 em relação à Configuração 16, no entanto, as ressonâncias e antirressonâncias características são similares, demonstrando a validade da Configuração 19 a partir de aproximadamente 5 kHz como pode ser observado na Figura 37.

Dessa maneira, dois casos são adequados para implementação do ensaio de SFRA *on-line*: injeção de sinais no *tap* da bucha H1 (ou qualquer outra fase) e medição através de Bobina de *Rogowski* em H0 (Configuração 17), e, injeção de sinais no *tap* da bucha H1 e medição em outro *tap* de quaisquer outras fases (Configuração 19).

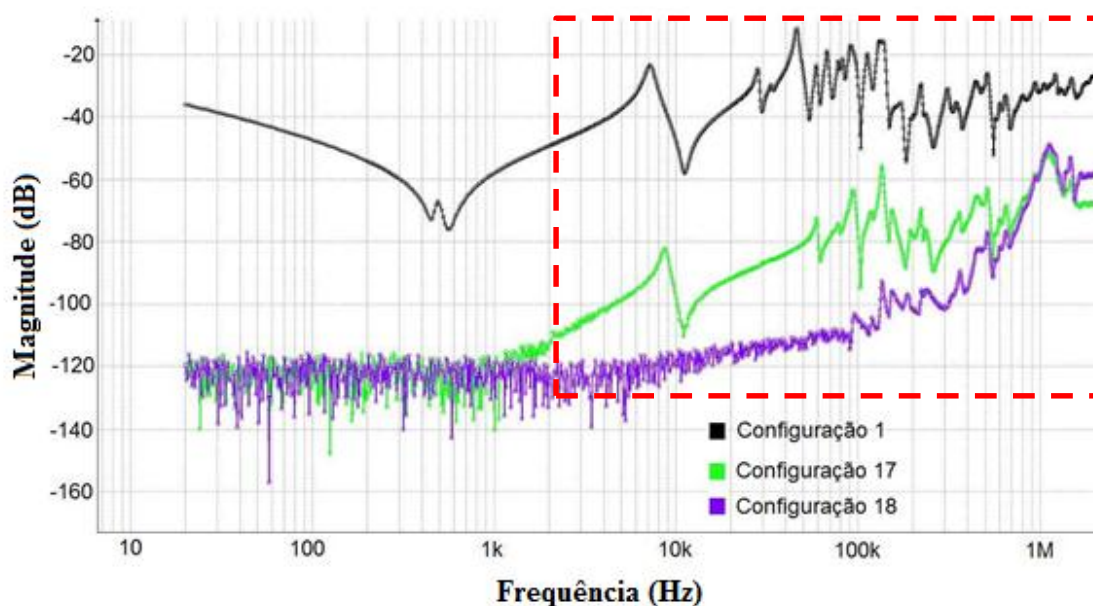


Figura 35. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 1, Configuração 17 e Configuração 18

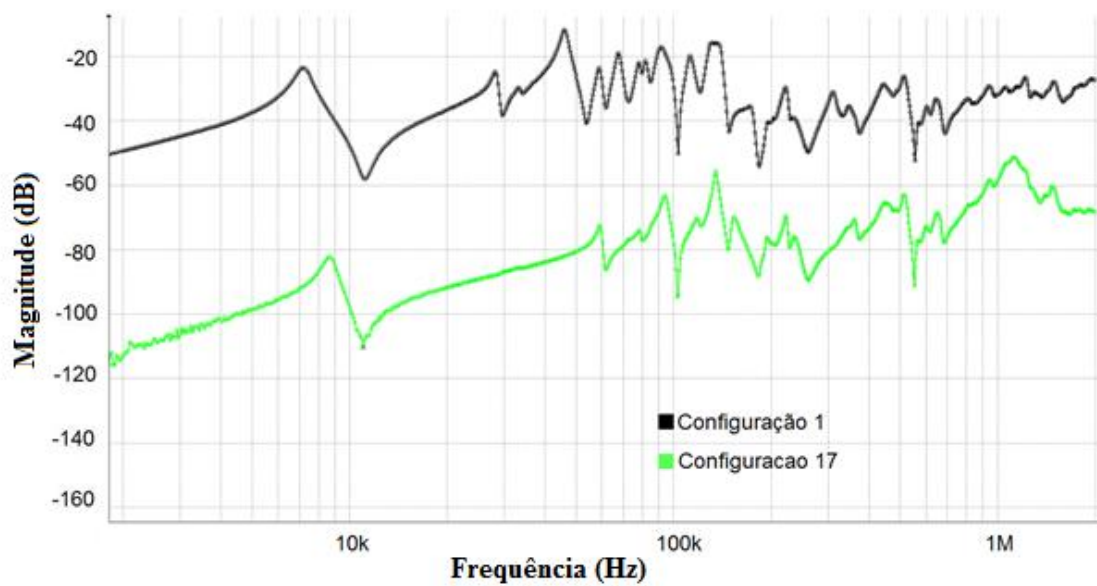


Figura 36. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 1 e Configuração 17

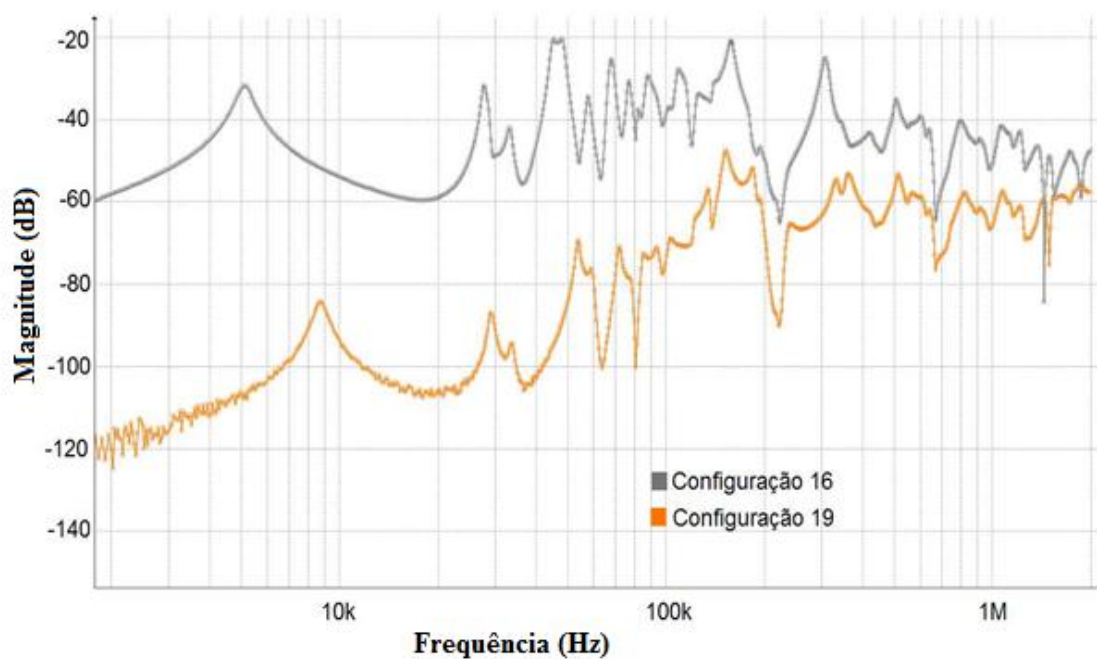


Figura 37. Comparação entre curvas de função transferência da Configuração 16 e Configuração 19

5.5 CARACTERIZAÇÃO DAS BUCHAS CONDENSIVAS

Conforme abordado na Seção 4.5, a caracterização das buchas condensivas envolvidas no ensaio de SFRA *on-line* são importantes para definição de suas ressonâncias características, e projeto do sistema de medição. Isso deve ser aplicado para cada tipo de bucha, visto que as capacitâncias devem mudar de projeto para projeto. No entanto como o transformador objeto de estudo possui quatro buchas idênticas, ou seja, de mesma família, com classe de tensões iguais, mesmo NBI e capacitâncias aproximadamente iguais, a medição de resposta em frequência foi realizada apenas na bucha de H1.

Segundo dados do fabricante a bucha H1 possui capacitância C1 de 224,18 pF e a capacitância C2 de 658,12 pF, com fabricação em 1982. No entanto, como se trata de buchas de aproximadamente trinta anos, tais valores podem ter variado ao longo do tempo. Dessa maneira faz-se necessária a medição dos valores de capacitância reais das buchas. A medição das capacitâncias C1 e C2 foram realizadas conforme Seção 4.4 com o auxílio de uma ponte de capacitância, fabricante Tettex, modelo MIDAS. A Figura 38 mostra a medição da capacitância C1 da bucha de H3.

A Tabela 5 apresenta os valores das capacitâncias medidas das buchas do transformador.

TABELA 5. VALORES DAS CAPACITÂNCIAS C1 E C2 MEDIDOS

Bucha	Circuito de Medição	Tensão [kV]	Capacitância [pF]
H0	C1	10	222,8
	C2	1	904,5
H1	C1	10	224,7
	C2	1	998,6
H2	C1	10	224,9
	C2	1	902,2
H3	C1	10	226,2
	C2	1	1002,0



Figura 38. Medição da capacitância C1 no transformador em campo

Em seguida, foi realizada a caracterização dos ramos de C1 e C2 da bucha de H1 em função da frequência, conforme descrito na Seção 4.4. Os resultados são apresentados em um gráfico da impedância em função da frequência como pode ser observado na Figura 39 e Figura 40. O equipamento FRAX 101 foi utilizado nessas medições. O resultado da medição foi utilizado para cálculo dos parâmetros RLC série dos respectivos ramos, conforme Figura 41, apresentados na TABELA 6, os quais serão utilizados para o projeto do circuito de proteção apresentado na seção seguinte.

As respostas da simulação e da medição são apresentadas na Figura 39 e na Figura 40. Neste caso, a curva da impedância encontrada na medição de resposta em frequência foi utilizada (principalmente através da frequência de ressonância) como base para determinação dos parâmetros L (obtido da Equação 9, da seção 5.4) e R (obtido através da varredura de valores), visto que através da simulação (utilizando software QUCS - *Quite Universal Circuit Simulator*), de acordo com a Figura 41, pode-se confrontar as duas curvas.

TABELA 6. PARÂMETROS RLC SÉRIE DOS RAMOS DE C1 E C2

Ramo	R	L	C
C1	200 Ω	39,1 μH	224,7 pF
C2	10 Ω	8,98 μH	998,6 pF

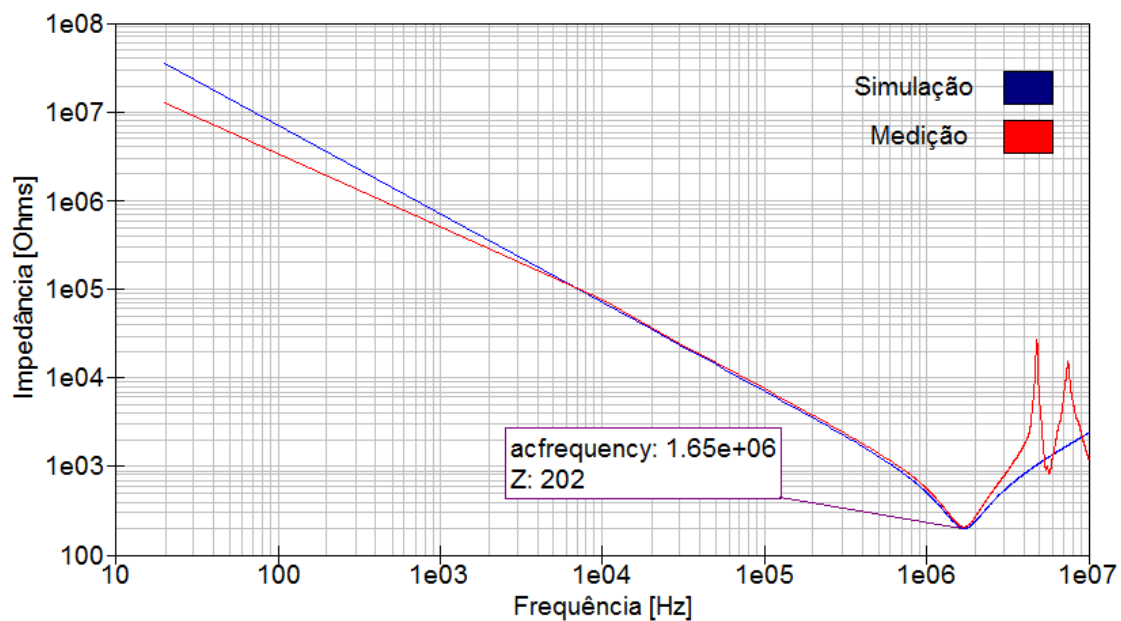


Figura 39. Caracterização da capacitância principal C1 da bucha

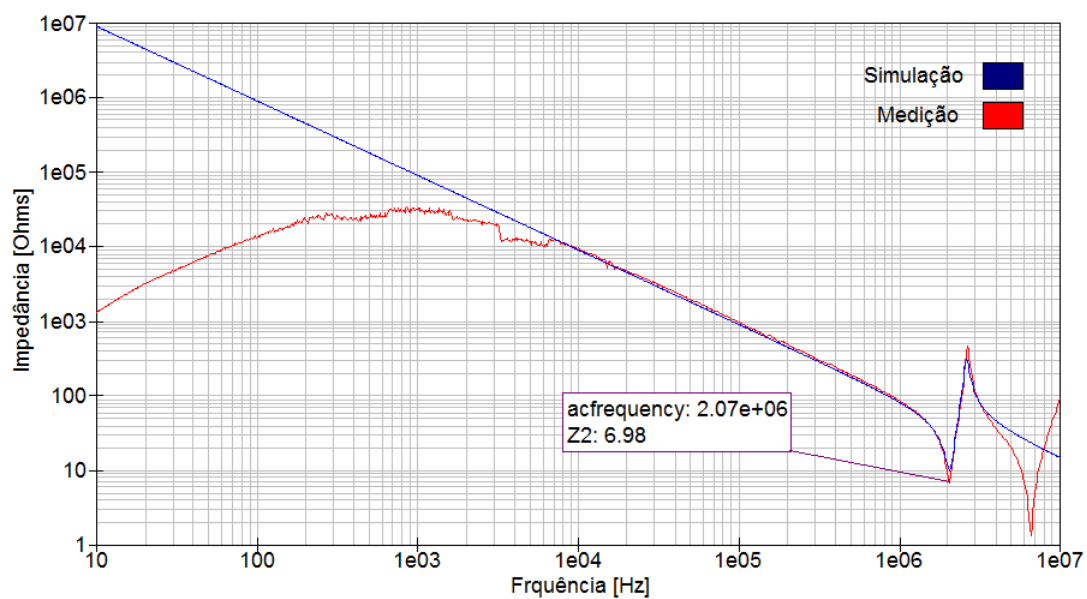


Figura 40. Caracterização da capacitância C2

De posse das curvas, pode-se notar que as ressonâncias características de ambos os ramos de capacitância são definidos à partir de 1,6 MHz no caso de C1 e à partir de 2 MHz no caso de C2, demonstrando que a resposta da bucha não apresenta grandes influências nas medidas finais de SFRA on-line com a utilização de *taps* capacitivos.

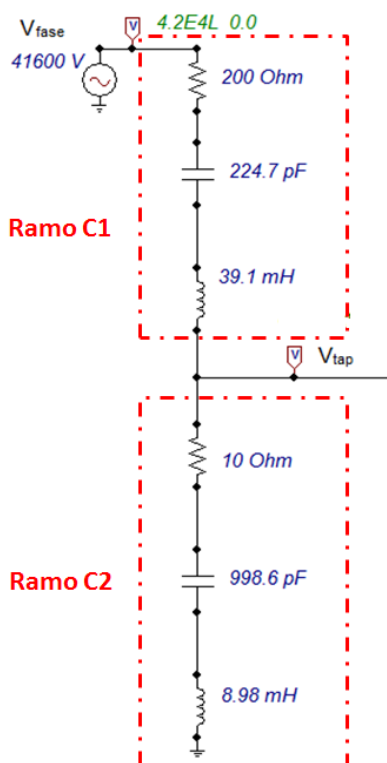


Figura 41. Circuito equivalente da bucha de alta tensão do transformador T2

5.6 CIRCUITO DE PROTEÇÃO

Como pode ser visto anteriormente, a faixa de frequência para análises de SFRA com injeção de sinais pelo *tap* capacitivo é de aproximadamente 1 kHz até 2 MHz, desta maneira optou-se pela construção de um filtro passa-faixas, com a finalidade principal de proteção, visto que quando o *tap* é aberto teremos a relação apresentada na Equação 1, no caso do transformador sob análise, tem-se uma tensão aproximadamente 7,5 kV, envolvendo riscos para os equipamentos e para os operadores.

A escolha do filtro foi baseada na ferramenta Síntese de Filtros do software de simulação QUCS. Desse modo optou-se por um filtro passa-faixa *Butterworth* de ordem 3, tipo PI, com banda passante de 1 kHz a 5 MHz, apresentado na Figura 42. Em seguida o filtro projetado foi alterado para o da Figura 43 com objetivo de simplificar o circuito. A simulação do ganho de ambos os filtros são apresentados na Figura 44.

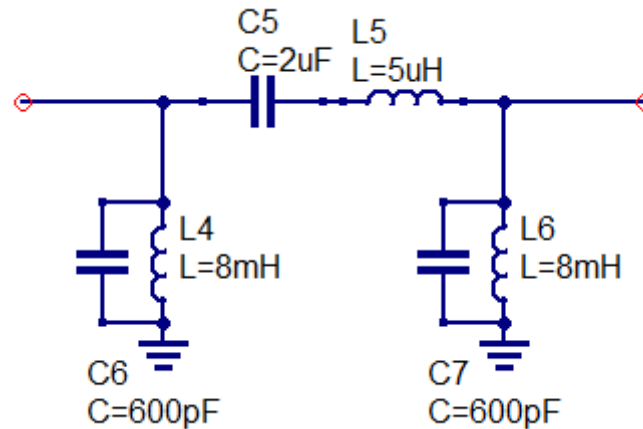


Figura 42. Filtro Butterworth passa-faixa

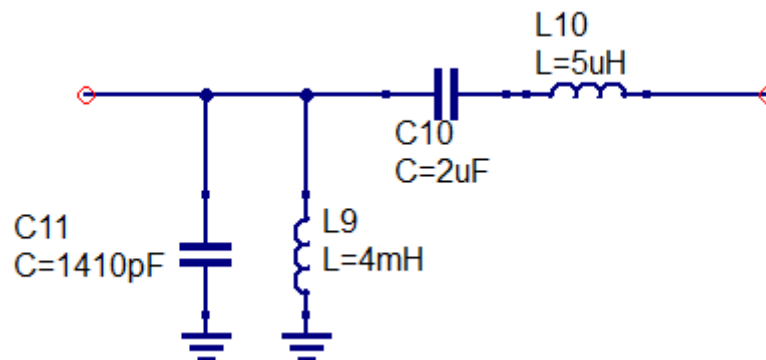


Figura 43. Filtro passa-faixa simplificado

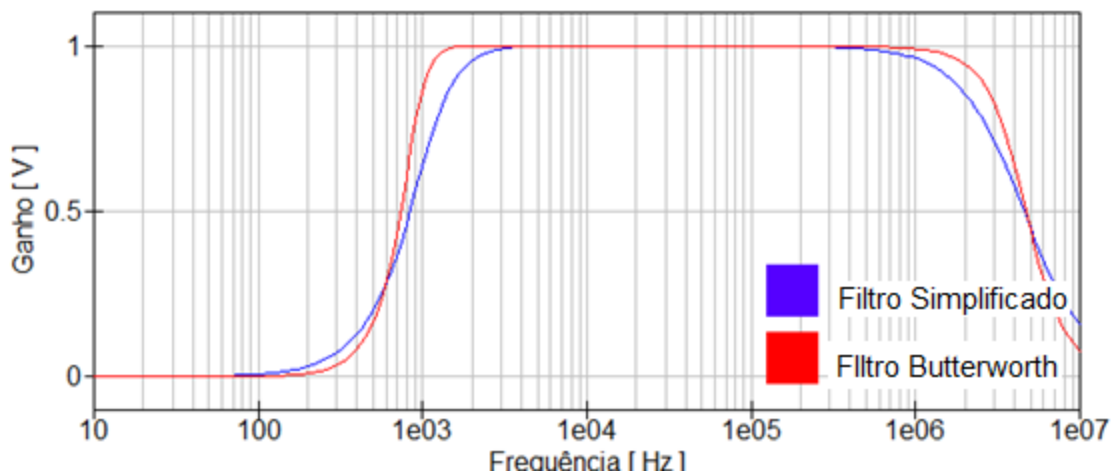


Figura 44. Ganho dos filtros *Butterworth* e Filtro Simplificado

Em seguida os parâmetros RLC da bucha foram incluídos na simulação com objetivo de verificar as demais características do circuito de medição, tais como tensão de saída no *tap* e corrente de forma a permitir a escolha adequada dos componentes. O circuito simulado pode ser observado na Figura 45, onde V_{fase} é o terminal conectado ao enrolamento do transformador, V_{tap} é saída do *tap* capacitivo e V_{out} é o terminal de saída que será conectado ao instrumento de medição de SFRA. Na simulação realizada a tensão de saída em V_{out} para uma tensão em $V_{\text{fase-terra}}$ máxima de 41,6 kV (ou 72 kV fase-fase) foi de 5mV. Considerando que a tensão máxima de entrada do instrumento é de 20 V pico-pico, a aplicação do filtro torna-se adequada para proteção do sistema de medição. A corrente máxima simulada foi de aproximadamente 3 mA.

Para escolha dos componentes, os valores de corrente e tensão simulados foram levados em consideração. Os capacitores e resistores utilizados são de suportabilidade superior a 100 V. Os indutores foram confeccionados com núcleo de ar, devido à aplicação do circuito para altas frequências, e com secção do fio de cobre esmaltado utilizado para condução de corrente até 147 mA. A Figura 46 apresenta o filtro de proteção confeccionado em caixa blindada metálica para o ensaio de SFRA *on-line*.

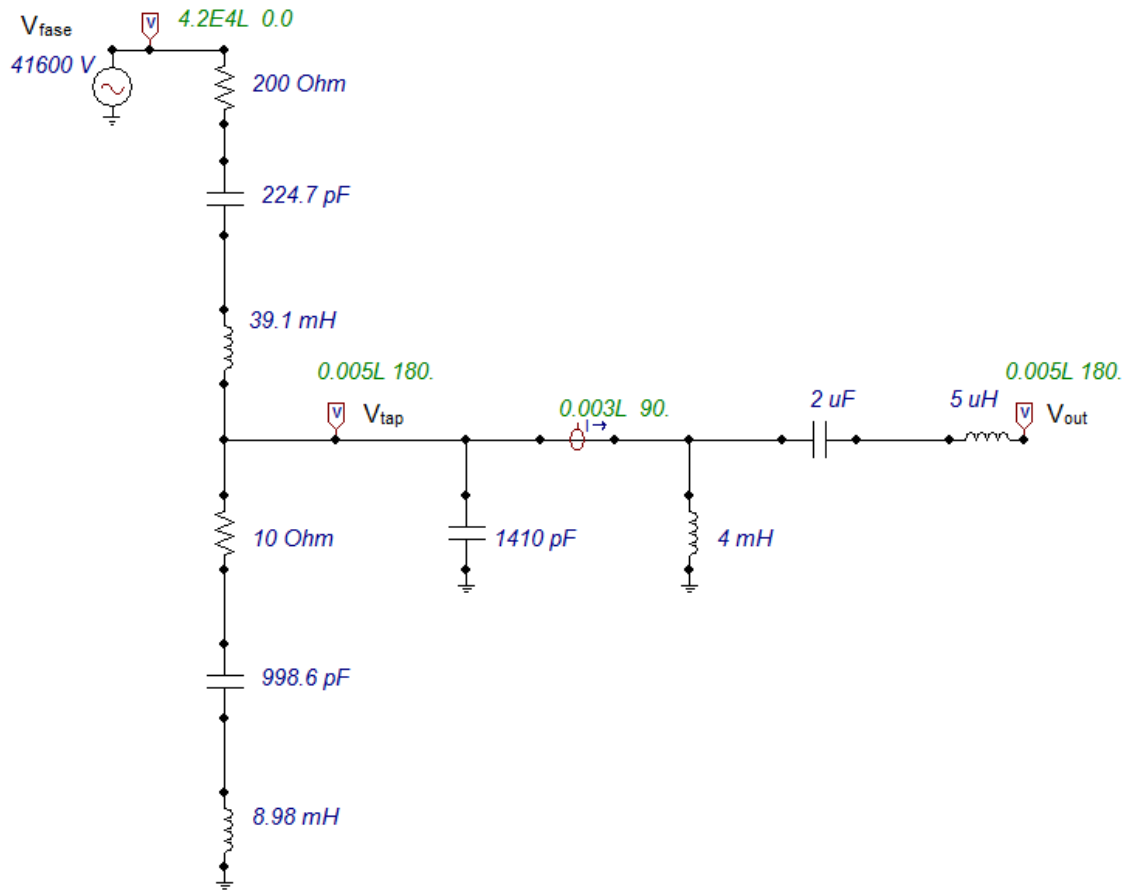


Figura 45. Circuito de simulação da bucha e filtro de proteção

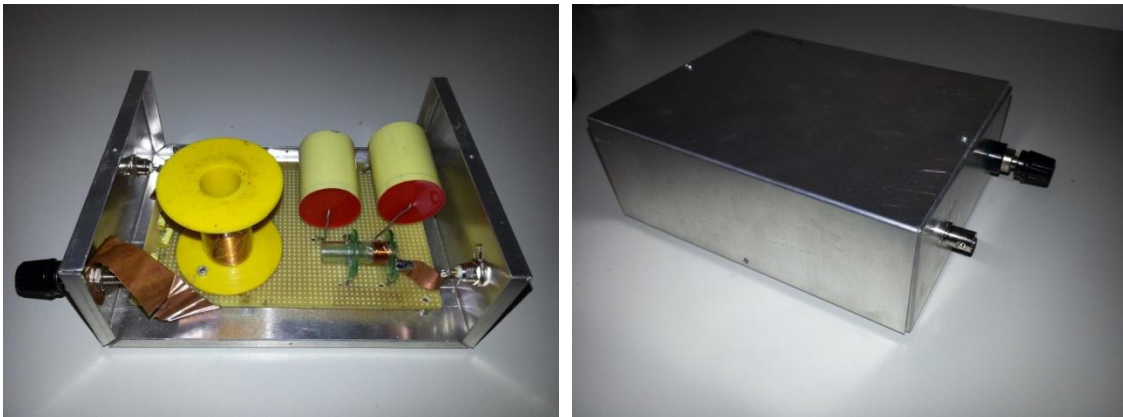


Figura 46. Filtro de proteção para SFRA *on-line*

Finalmente, com intuito de comissionar o filtro, foi realizado um ensaio de resposta em frequência em ambas as direções do filtro, cujo resultado é apresentado na Figura 47. Na Configuração 1 o sinal é injetado através de V_{tap} ,

e na Configuração 2 o sinal é injetado através de V_{out} . Isso é importante pois a proteção deve atuar como um filtro passa-faixa bidirecional, ou seja, tanto visto através do terminal V_{tap} quanto do terminal V_{out} com uma banda passante de 1 kHz a 2 MHz, uma vez que nas configurações fase-fase, como na configuração apresentada na Figura 27 vista no Capítulo 4, são necessários dois filtros de proteção.

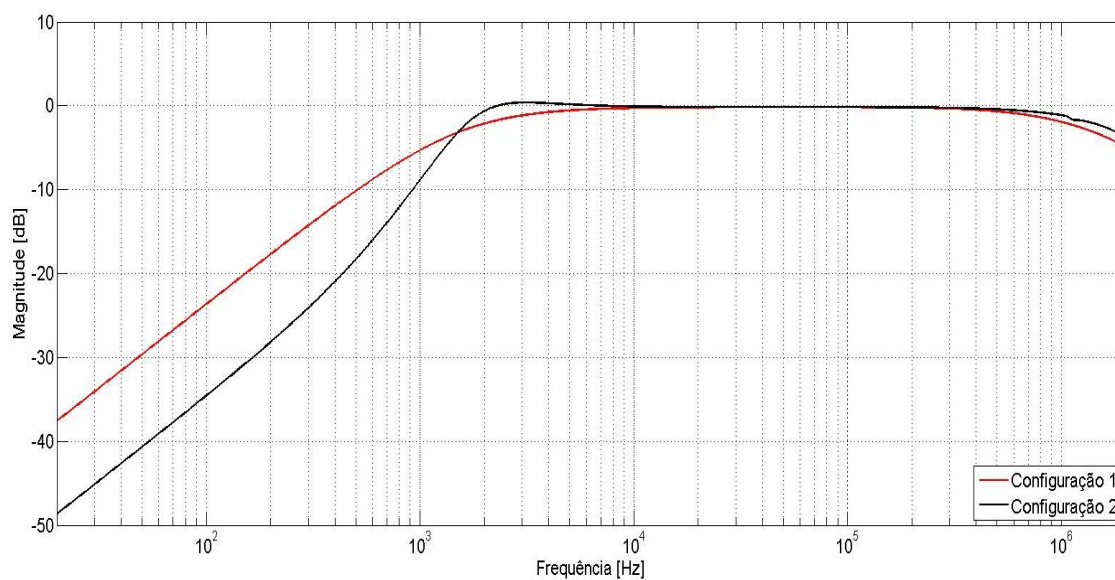


Figura 47. Resposta em frequência do filtro nas configurações de entrada 1 e 2

Em seguida o filtro foi adaptado ao transformador sob análise e comissionado novamente, sendo verificada a sua suportabilidade dielétrica frente aos 72 kV, não havendo perfurações dielétricas, descargas disruptivas ou quaisquer anormalidades durante a energização. A Figura 48 apresenta a adaptação do circuito de proteção ao *tap* da bucha de alta tensão do transformador.



Figura 48. Adaptação do circuito de proteção ao *tap* de bucha condensiva

5.7 ARRANJO DE ENSAIO

Uma vez definida as configurações mais adequadas para utilização dos *taps* como ferramenta de ensaio de SFRA, caracterização das buchas que influenciaram os testes, e aplicação do circuito de proteção, os estudos foram concentrados na implementação do sistema de injeção de sinais, viabilizando a medição do transformador energizado. Como resultado final o estudo irá indicar a melhor configuração de ensaio a ser aplicado no transformador sob estudo. Além disso, serão avaliadas diferentes condições de carga no transformador com o objetivo de verificar a influência de um sistema de potência conectado à um transformador durante a realização dos ensaios de SFRA *on-line*.

O arranjo completo para o ensaio *on-line* dependerá, além do transformador sob teste, do circuito de alimentação e cargas alimentadas por este. No caso do equipamento analisado, o terminal de baixa tensão é alimentado por um grupo motor-gerador com tensão de saída do gerador de até 6,9 kV e potência de 6 MVA, que por sua vez é alimentado por um transformador de 2,5 MVA, 13,8 kV – 6,9 kV, o qual está ligado diretamente a rede elétrica. A Figura 77 do Anexo 1 apresenta o circuito de alimentação do transformador sob ensaio.

Durante a operação normal de um transformador, seja este alocado em uma subestação de geração, interligação ou distribuição, a variação de cargas ligadas neste pode ser significativa, dependendo inclusive das manobras do sistema. Com intuito de simular estas variações, foram testadas três condições que tentaram representar diferentes cargas do sistema.

A condição inicial é de ligação do transformador T-2, sob ensaio, à uma linha de transmissão, com para-raios de linha, conectada às buchas de passagem que dão acesso ao laboratório de alta tensão, como pode ser observado na Figura 49. Estas, por sua vez, estão ligadas aos cabos de alta tensão, e estes ligados à uma chave seccionadora que será manobrada para ligação das cargas.

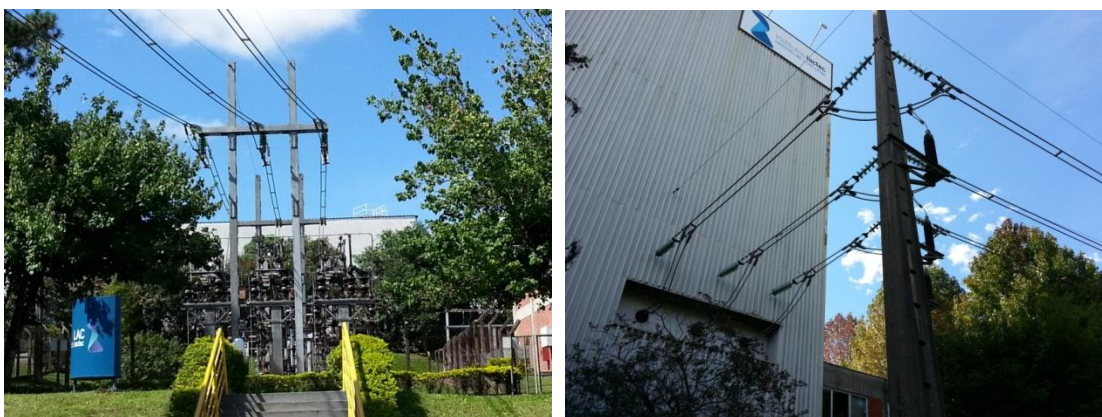


Figura 49. Linhas de transmissão conectando o transformador às buchas de passagem

A primeira condição (Carga 1) de carregamento testada foi a inclusão (além das cargas da linha de transmissão e cabos) de um transformador trifásico de 112,5 kVA, Impedância percentual de 3,43%, 13,2 kV – 220/127V, tipo de ligação delta-estrela, operando em vazio, representando uma carga indutiva.

A segunda condição (Carga 2), foi de uma carga resistiva trifásica de 30 kW ligada na baixa tensão do transformador de 112,5 kVA, o qual foi energizado pela alta tensão, a Figura 50 apresenta este circuito. Nessa situação houve limitação de tensão de até no máximo 13,2 kV na energização

do transformador T-2 (sob ensaio) devido a classe de tensão do transformador usado como carga.

Finalmente, na terceira condição de carregamento (Carga 3), a baixa tensão do transformador de 112,5 kVA foi curto circuitada com objetivo de circulação da corrente nomina. Este conjunto de equipamentos formará o arranjo de ensaio completo que estará energizado durante a realização dos ensaios de SFRA *on-line*.

As tensões e as correntes do sistema, com inclusão das cargas, foram monitoras por um conjunto de TPs e TCs instalados na alta tensão do transformador de 112,5 kVA.



Figura 50. Carga resistiva trifásica alimentada por transformador trifásico de 112,5 kVA e conjunto de TPs e TCs de medição

5.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SFRA *ON-LINE* ENTRE FASE E NEUTRO

Para realização das medidas entre fase e neutro o arranjo de ensaio foi preparado de acordo com a Figura 27. Antes da energização, no entanto, um novo ensaio (com a mesma configuração) foi realizado com objetivo de se obter a função transferência da nova configuração, levando em conta o circuito de proteção acoplado ao *tap* capacitivo. A Figura 51 apresenta essa resposta

realizada entre *tap* de H1 e Bobina de *Rogowski* em H0 (aterrado). O novo circuito de ensaio deverá ser fixo, e seu arranjo não poderá ser mais alterado, visto que alterações de aterramento, conexões e comprimentos de cabo podem influenciar nas medidas.

Comparativamente as respostas do circuito, com e sem o filtro de proteção, são apresentadas na Figura 52, com intuito de validar a inclusão do filtro nas medições energizadas. Nota-se que apesar das diferenças introduzidas pelos novos elementos do filtro de proteção, as duas respostas possuem ressonâncias praticamente idênticas à partir de aproximadamente 5 kHz, sendo possível identificar características do transformador sob análise na resposta entre fase e neutro. A diferença entre as respostas à partir de 700 kHz pode ser atribuída a atenuação provocada pelo filtro, de acordo com a Figura 47.

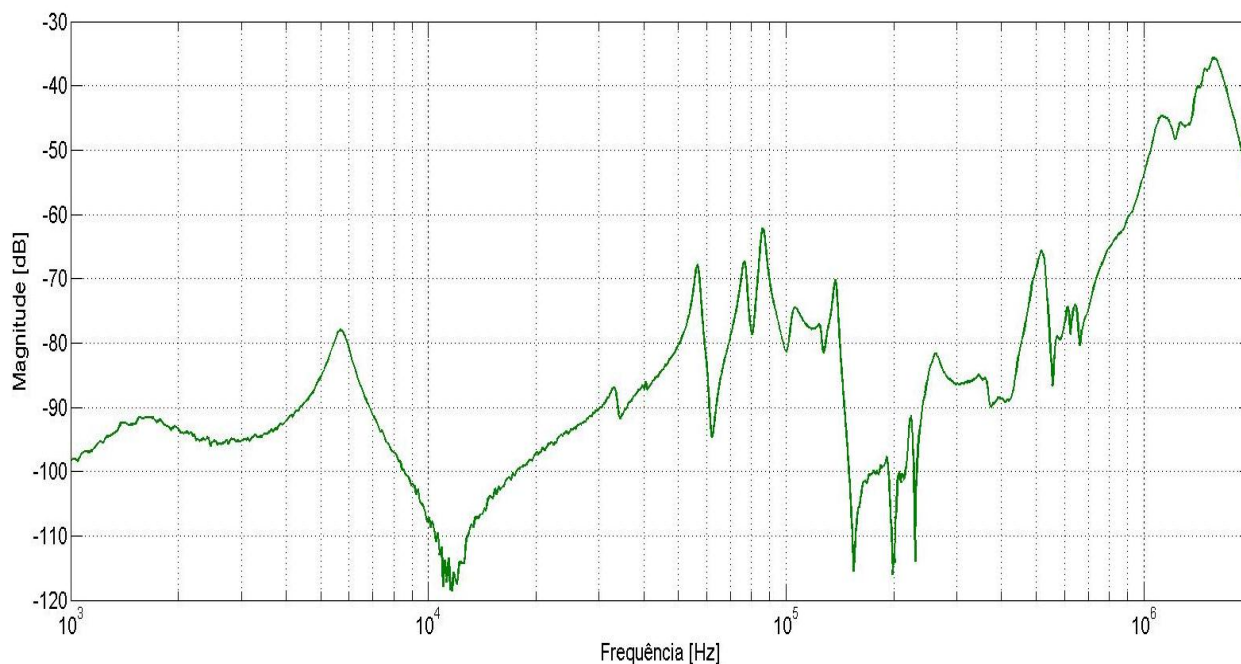


Figura 51. Resposta em frequência da configuração fase e neutro com filtro de proteção e transformador desenergizado

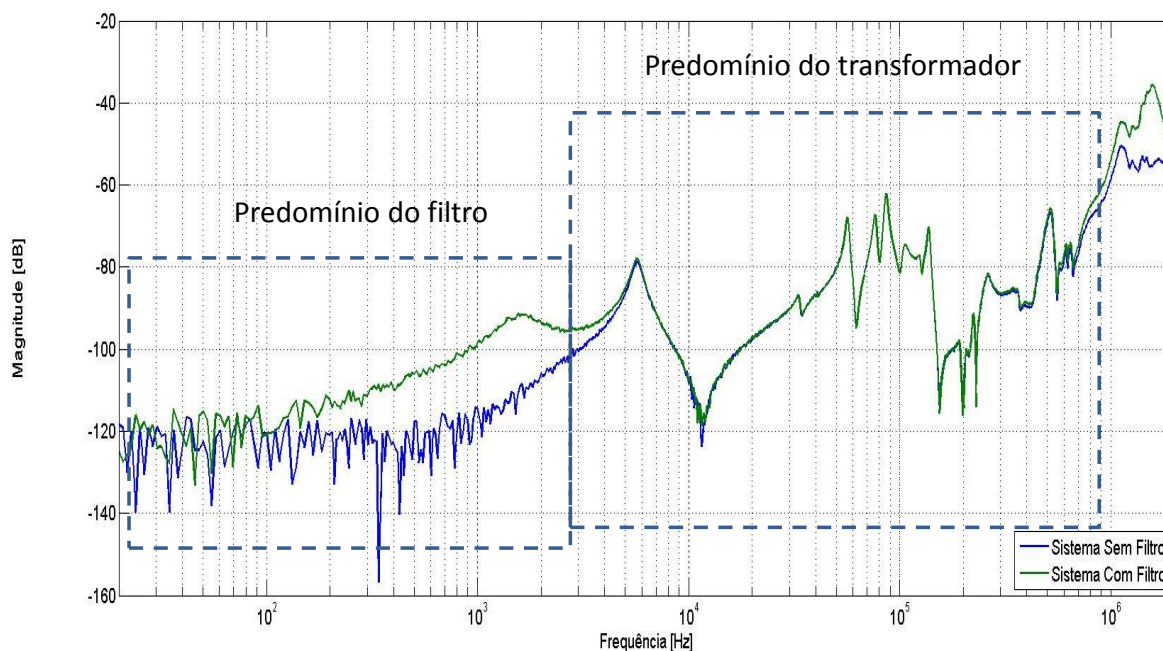


Figura 52. Comparação entre respostas de sinais injetados pelo *tap*, com e sem filtro

Em seguida o circuito foi manobrado e energizado de acordo com a Figura 77 (Anexo 1) com elevação da tensão gradativa até aproximadamente a tensão nominal do transformador. Então o ensaio de resposta em frequência foi novamente realizado. A resposta desta análise é apresentada na Figura 53 e Figura 54 comparativamente com o sistema desenergizado (incluindo filtro). Pode-se notar, neste caso, que as curvas são praticamente sobrepostas, com pequenas diferenças principalmente entre 90 e 400 kHz. Uma vez que durante a energização do sistema, um novo circuito foi conectado ao lado de baixa tensão do transformador, incluindo um grupo motor-gerador e novas impedâncias acopladas.

Além da comparação entre caso energizado e desenergizado foram realizadas medidas também com a variação de tensão, desde 200 V (Energizado Tensão 1), passando por uma tensão intermediária de aproximadamente 13,2 kV (Energizado Tensão 2) até a tensão nominal (Energizado Tensão 3). Através da Figura 53 (melhor detalhada na Figura 54) pode-se observar que não houveram diferenças entre respostas com variação de tensão, mas apenas entre sistema energizado e desenergizado.

Tais medidas comparativas demonstram a validade da realização do ensaio de resposta em frequência pela injeção de sinais no *tap* capacitivo e com medição no neutro do transformador com este energizado. Além disso, o resultado obtido com o novo arranjo de ensaio e com o transformador energizado será considerado a nova assinatura do transformador (ou curva de referência), e novos resultados obtidos à partir daí deverão ser confrontados com esta para detectar evidências de falhas.

Por razões práticas os estudos foram realizados no enrolamento H1-H0, o qual foi suficiente para demonstração da aplicabilidade da técnica de SFRA *on-line*, mas para um resultado completo, poderia ser expandido para os demais enrolamentos, H2-H0 e H3-H0, obtendo-se assim a assinatura completa referente aos enrolamentos de alta tensão do transformador.

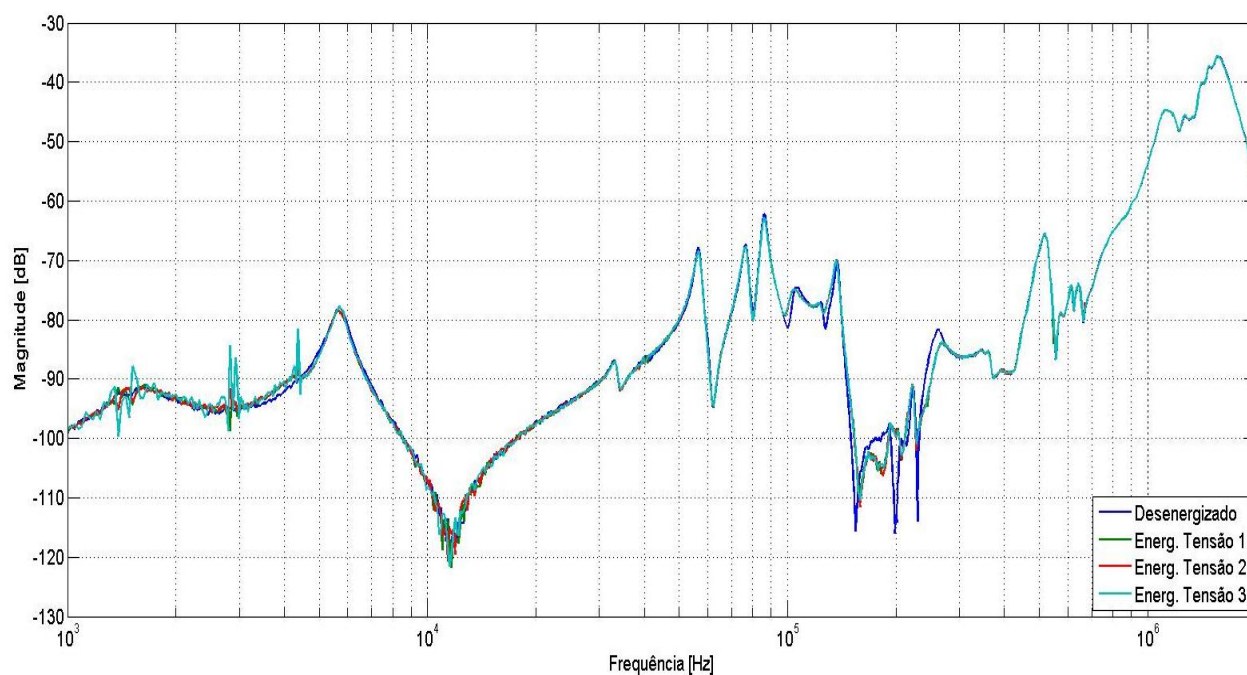


Figura 53. Comparação entre sistemas energizado e desenergizado (com proteção), entre fase e neutro (H1-H0)

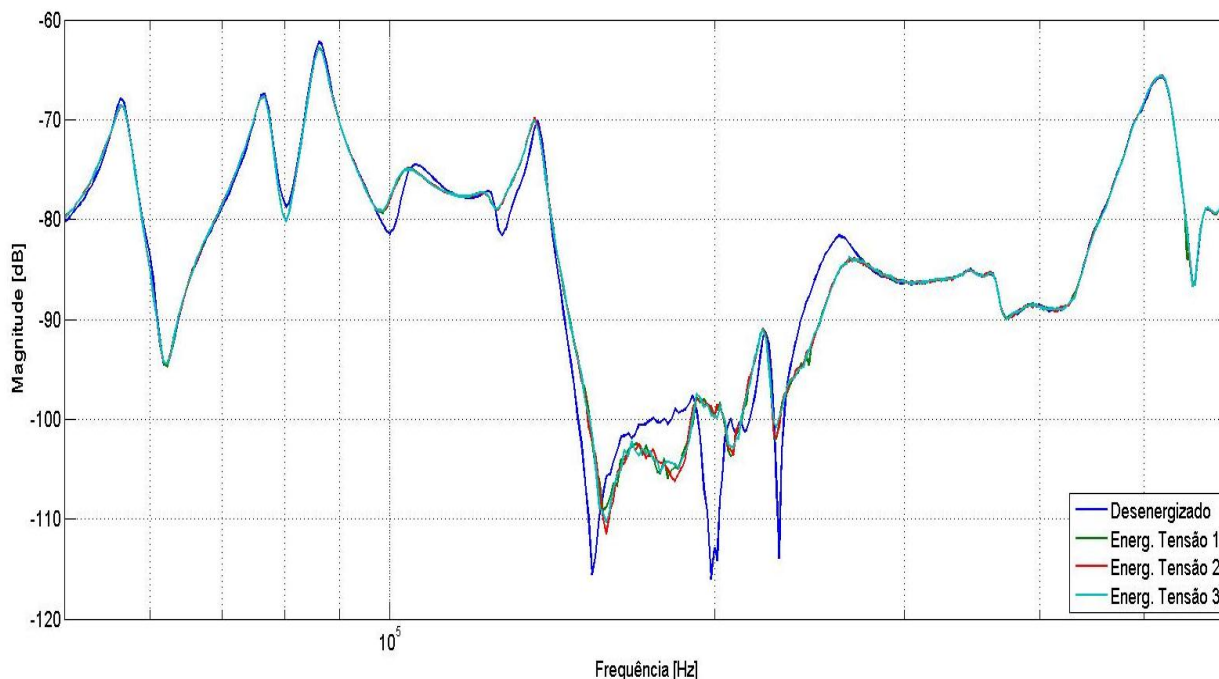


Figura 54. Detalhe comparativo das respostas entre sistema energizado e desenergizado com variação de tensão (H1-H0)

Visto que ocorreram variações do sistema desenergizado para o sistema energizado, devido a inclusão das “novas” impedâncias conectadas na baixa tensão do transformador, optou-se pela inclusão de cargas também na alta tensão do equipamento, conforme as condições citadas na seção 5.6, simulando a condição real de operação de um transformador. A Figura 55 apresenta o resultado comparativo entre o sistema energizado à vazio, e os sistemas com carga.

Pode-se notar que não houveram diferenças entre os três diferentes tipos de carga, visto que a impedância equivalente praticamente não foi alterada, nas condições de Carga 1, Carga 2 e Carga 3. No entanto, comparativamente com o sistema à vazio, ou seja, sem o transformador de 112,5 kVA, que representa uma carga indutiva, houveram diferenças entre 4 e 9 kHz e entre 100 e 900 kHz. Demonstrando que a variação da impedância equivalente do sistema pode alterar as respostas em frequência *on-line*.

Finalmente, com intuito de verificar possíveis alterações nos enrolamentos do transformador, visto que é inviável a geração de defeitos no seu interior, variou-se o comutador sob carga (OLTC). Pode-se observar, através da Figura 56, diferenças entre as respostas obtidas ao longo de praticamente toda região de comparação. Neste caso, o resultado era esperado, ou seja, as diferenças de amplitude e deslocamentos das ressonâncias na frequência das curvas de funções transferência da relação de tensão entre saída e entrada ao longo de praticamente toda a faixa de frequência, visto que a alteração do OLTC promove a mudança da relação de transformação e conseqüente variação do número de espiras do enrolamento.

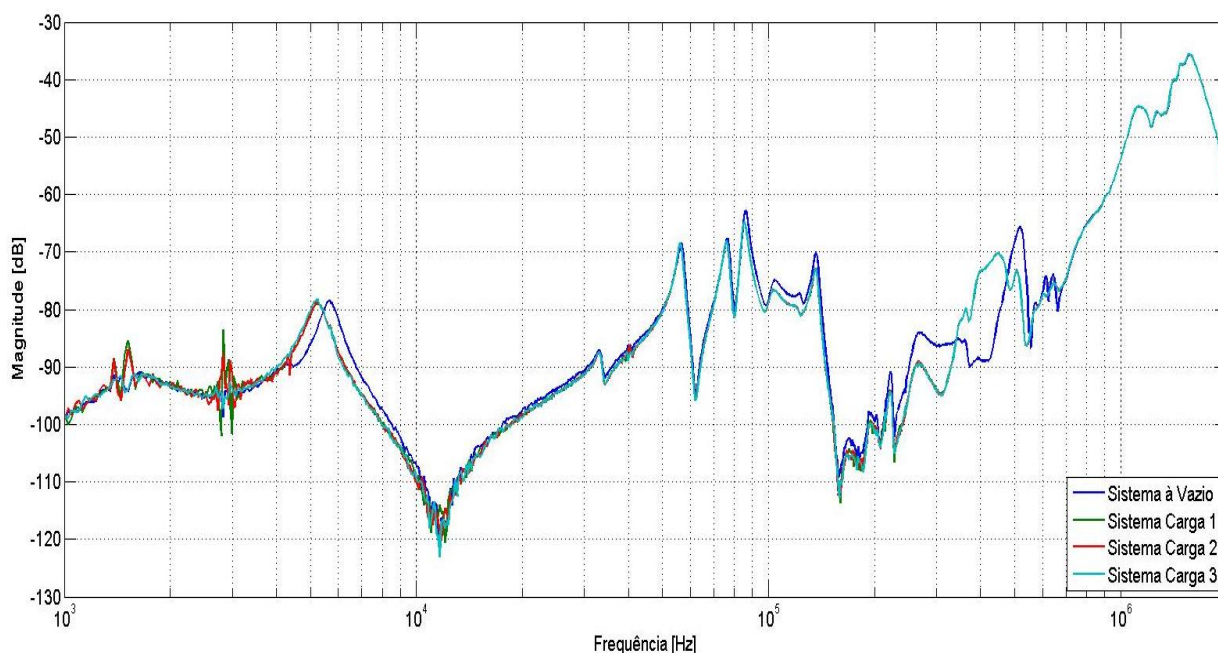


Figura 55. Comparação entre sistema energizado à vazio e sistema energizado com cargas

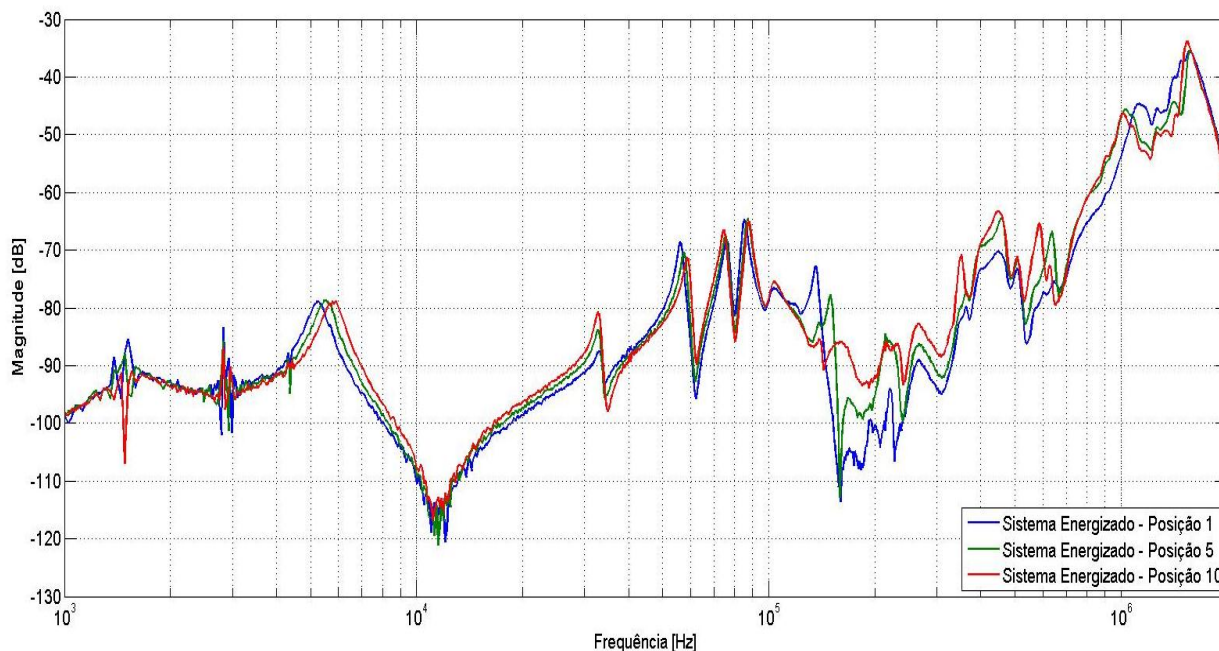


Figura 56. Comparação entre sistemas energizados com diferenças nas posições dos comutadores

Desta maneira, nota-se a necessidade de um critério para interpretação de ensaios com o transformador energizado e conectado ao sistema de potência. Através da criação de um banco de respostas possíveis, geradas pelas variações apresentadas anteriormente, mas que devem ser cuidadosamente diferenciadas de possíveis defeitos e variações nos parâmetros RLC do transformador. Por exemplo, diferenças entre 4 e 9 kHz e entre 100 e 900 kHz, como pode-se analisar na Figura 55, são indícios de variações de carga, enquanto que diferenças ao longo de todo espectro de frequência, observado na Figura 56, são indícios de deformações ou alterações no número de espiras dos enrolamentos, causadas por um curto entre espiras por exemplo. Além da definição das faixas de frequências na qual as alterações podem ocorrer devido a uma alteração de cargas, pode-se padronizar também, a topologia do sistema durante a realização dos ensaios, evitando-se assim a variação da impedância equivalente do sistema e conseqüentemente a variação das respostas em frequência obtidas em ensaios realizados ao longo da vida útil do transformador.

5.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SFRA ON-LINE ENTRE FASES

Para realização das medidas entre fases, o arranjo de ensaio foi preparado de acordo com a Figura 28. Assim como no caso anterior, um novo ensaio foi realizado levando-se em conta os circuitos de proteção acoplados aos *taps* capacitivos.

Comparativamente as respostas do circuito com e sem os filtros são apresentadas na Figura 57. Pode-se observar que somente à partir de 20 kHz, os resultados tornam-se próximos entre si, com ressonâncias características similares. À partir de aproximadamente 750 kHz as respostas tornam a apresentar resultados não sobrepostos devido à influência do filtro, conforme Figura 47. Apesar das diferenças obtidas, é possível observar a influência dos enrolamentos na configuração envolvendo o filtro de proteção, portanto, a medida é válida para sistemas energizados.

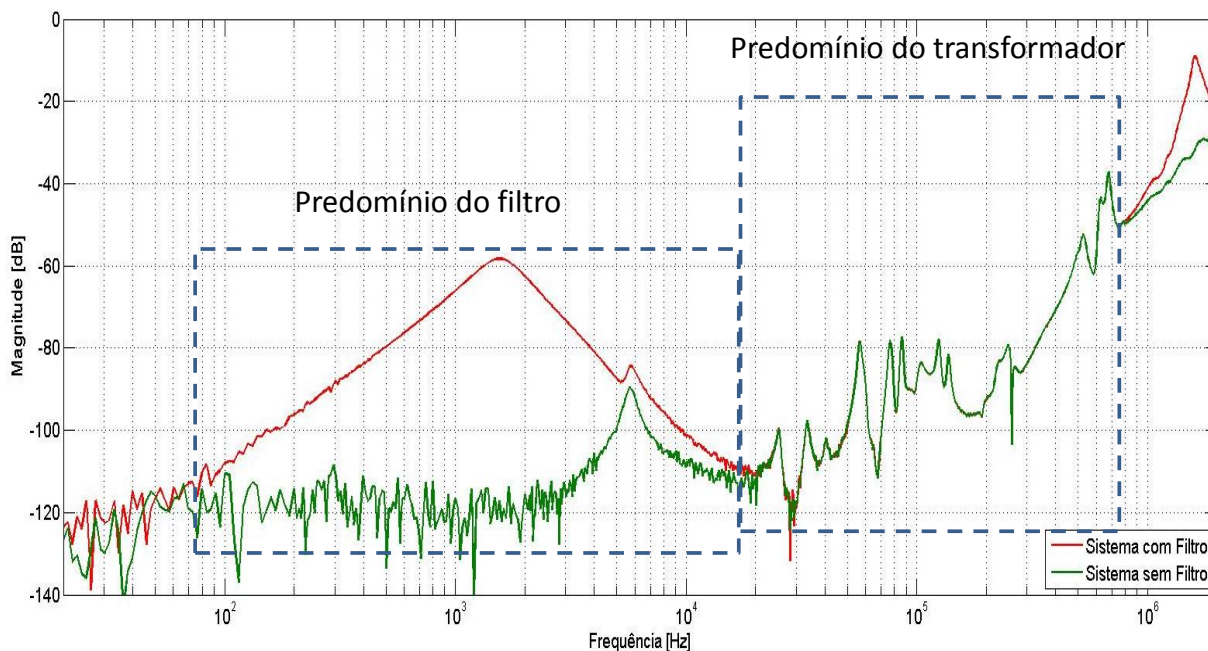


Figura 57. Comparação entre respostas de sinais injetados pelo tap e medido em outro tap com e sem filtros

Em seguida o circuito foi energizado com elevação gradativa da tensão, até aproximadamente a tensão nominal do transformador. Então o ensaio de resposta em frequência foi novamente realizado. A comparação das respostas entre sistema desenergizado e energizado em três níveis distintos de tensão é apresentado na Figura 58. Neste caso, o sinal resultante apresentou ruídos até aproximadamente 50 kHz sendo aplicada a ferramenta de alisamento digital, para melhor análise dos resultados obtidos, conforme Figura 59. Pode-se notar que entre 20 kHz e 300 kHz as respostas são diferentes, mas que de forma geral, ou seja, entre 1 kHz a 2 MHz as curvas possuem tendências similares. De qualquer maneira, pode-se dizer que essas diferenças eram esperadas, devido à inclusão das impedâncias acopladas ao circuito de baixa tensão do transformador (Anexo 1), necessária para que o transformador esteja na condição energizada. Da mesma forma que no caso anterior, a assinatura (curva de referência) para o caso fase-fase será aquela considerando o circuito de proteção, com o transformador energizado, e conseqüentemente as demais medições *on-line* deverão ser confrontadas com essa medida ao longo da vida útil do transformador.

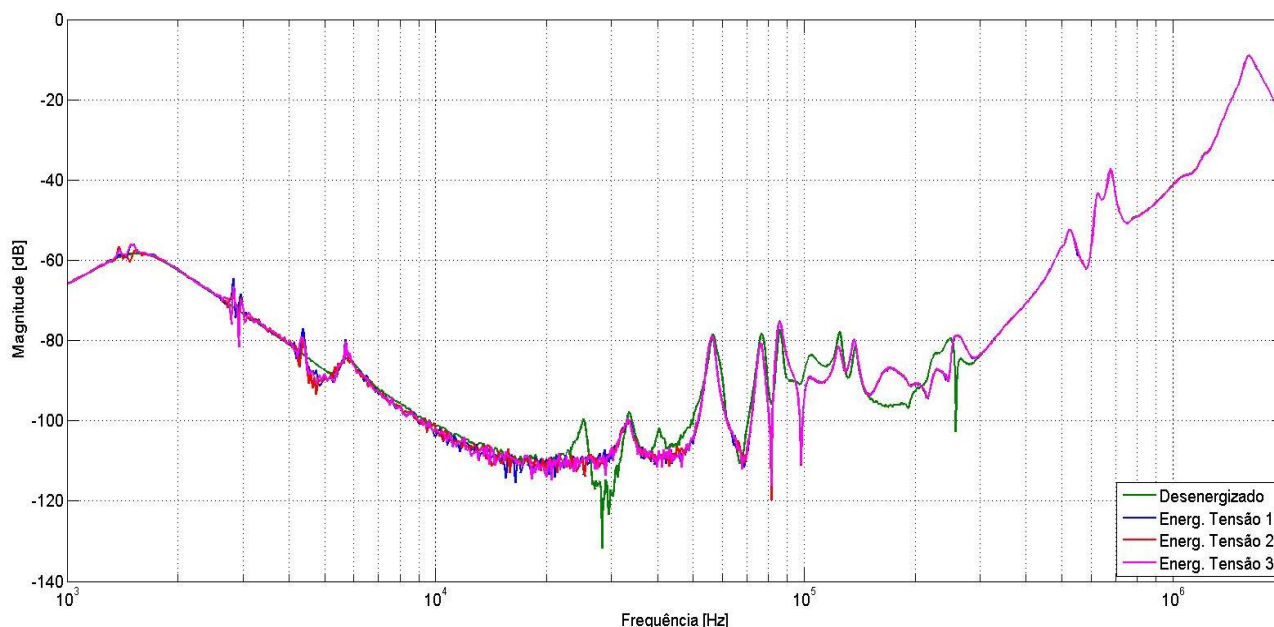


Figura 58. Comparação entre sistema energizado e desenergizado (H2-H3)

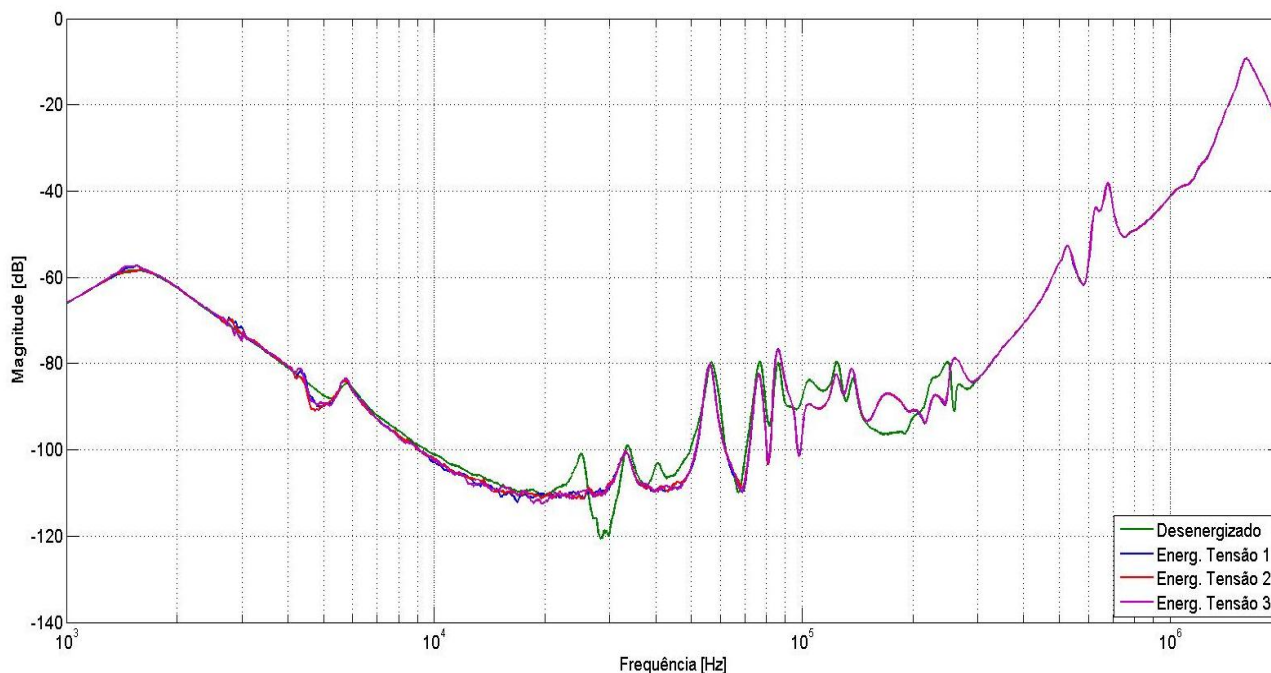


Figura 59. Comparação entre sistema energizado e desenergizado com aplicação de alisamento digital

Após energização do circuito, foi verificado também a alteração das respostas frente à inclusão do transformador de 112,5 kVA no secundário (terminal superior) do transformador T-2, com carga resistiva e em curto, esta comparação é apresentada na Figura 60. Observa-se neste caso, variações à partir de 10 kHz até aproximadamente 900 kHz entre os sistemas com carga e em vazio.

Finalmente foram comparadas as respostas do sistema com transformador energizado com variação da posição do comutador sob carga. Foram observadas diferenças nos enrolamentos, especialmente entre 30 kHz e 300 kHz. Nota-se neste caso, diferentemente da configuração fase-neutro, que as diferenças são menos sensíveis às alterações dos enrolamentos.

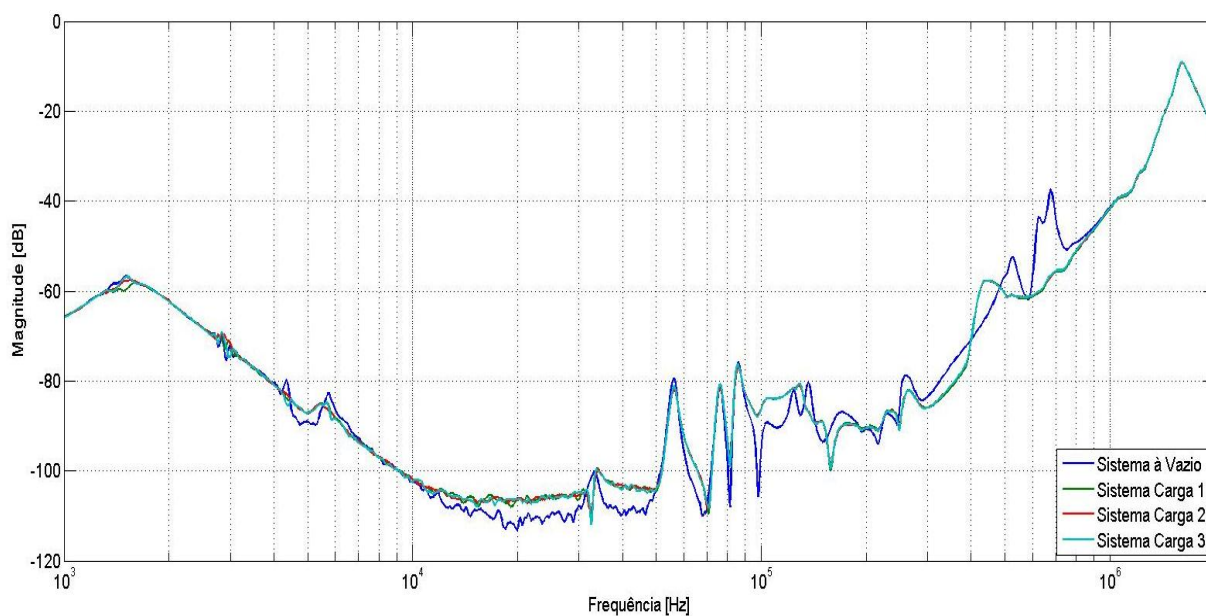


Figura 60. Comparação entre sistemas energizado à vazia e com cargas

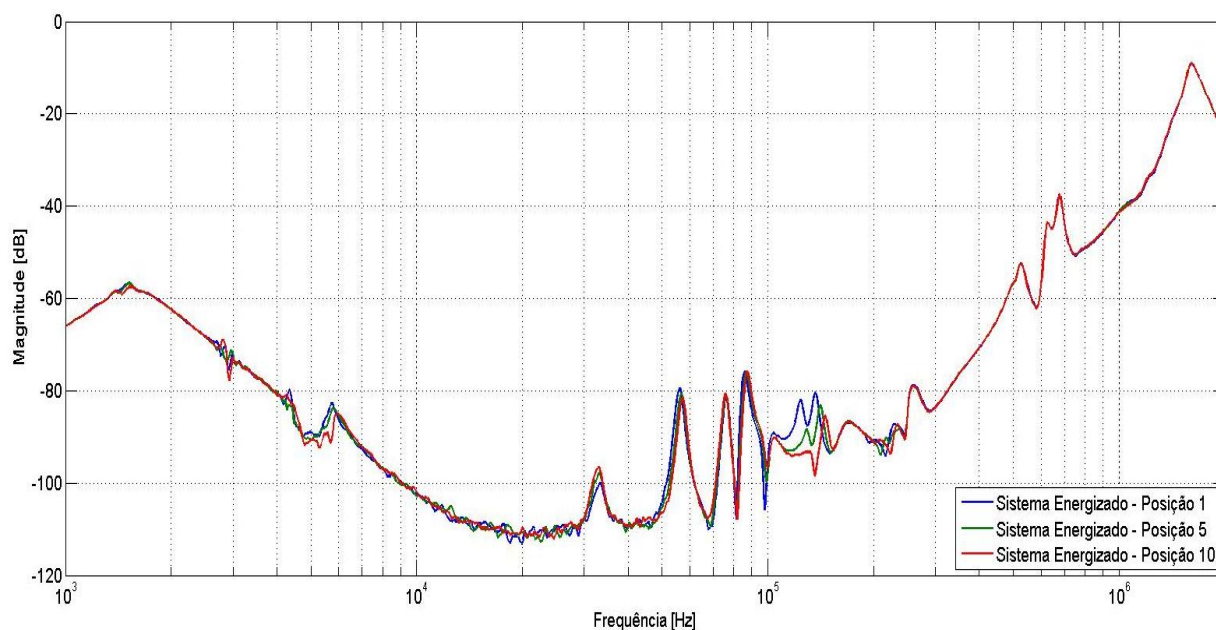


Figura 61. Comparação entre sistemas energizados com diferenças nas posições dos comutadores

Nota-se, portanto que ambos os métodos podem ser aplicáveis em transformadores energizados, no entanto, no ensaio entre fases observa-se uma maior sensibilidade quanto aos ruídos externos à medição, visto que parte do sinal é drenado para o terra, uma vez que o neutro é aterrado, como pode

ser observados na Figura 23 (seção 4.3). Além disso, a detecção de defeitos (alterações nos enrolamentos) é mais dificilmente detectada nesta condição, visto que dois enrolamentos são avaliados simultaneamente, diferentemente do circuito entre fase e neutro conforme a Figura 24 (seção 4.3). No entanto, o estudo de ambas as configurações foram importantes, visto que em transformadores sem neutro acessível a configuração fase-fase pode ser uma alternativa à medida fase-neutro.

Além disso, foram avaliadas as alterações das respostas em frequência considerando a alteração da impedância equivalente do sistema, e, alterações do carregamento do transformador, sendo que no primeiro caso foram observadas alterações enquanto que no segundo não, mostrando desse modo, a necessidade de padronização da topologia do sistema elétrico (impedância equivalente) durante a realização de ensaios *on-line* ao longo da vida útil do transformador. No entanto, o mesmo não é necessário para alterações das condições de carregamento, mostrando que a variação das correntes no transformador não influenciam nos ensaios de resposta em frequência.

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como principal objetivo a criação de uma metodologia para realização de ensaios de resposta em frequência com o transformador energizado, aplicável a qualquer transformador que possua buchas condensivas, como é caso dos transformadores de potência.

Primeiramente, foi realizado um estudo das técnicas aplicáveis em ensaios de resposta em frequência *on-line*, com análise do melhor método para realização dos ensaios em campo. A técnica escolhida foi a de SFRA (*Sweep Frequency Response Analysis*) *on-line* utilizando os *taps* capacitivos de buchas condensivas como acesso ao núcleo do transformador, visto que a quantidade de equipamentos necessários para realização dos ensaios é menor que no caso de IFRA (*Impulse Frequency Response Analysis*) *on-line*. Além disso, para validação dos resultados, no caso analisado, a técnica de SFRA *on-line* é mais indicada, devido à dificuldade do método de IFRA em aplicar impulsos atmosféricos com o transformador energizado.

Para realização dos testes experimentais foi realizado um estudo de caso em um transformador trifásico de 6 MVA alocado na subestação dos Institutos LACTEC. Uma vez que cada transformador é visto como um projeto único, faz-se necessário o estudo prévio dos elementos essenciais para realização dos ensaios. Nesse caso, é importante realizar a caracterização das buchas de alta tensão do transformador. O resultado dessa caracterização são os parâmetros RLC desta e a definição das ressonâncias e antirressonâncias característica da bucha. De acordo com os resultados obtidos, foi visto que as ressonâncias da bucha não tem poder de influenciar significativamente o resultado das medidas de função transferência dos enrolamentos do transformador. Quanto aos parâmetros RLC, estes foram utilizados para projeto do filtro de proteção. A metodologia de caracterização das buchas pode ser aplicada a qualquer tipo de transformador, contanto que as buchas sejam condensivas e possuam derivação capacitiva.

A próxima etapa foi de projeto e confecção do circuito de proteção, visando a proteção dos equipamentos de medição de resposta em frequência

visto que altas tensões surgirão nos *taps* durante o regime de operação do transformador. Assim, a proteção atuará como um filtro passa-faixa, de banda passante de 1 kHz até aproximadamente 2 MHz. O circuito de proteção também poderá ser aplicado a outros transformadores, com adaptação dos componentes utilizados nos projetos, principalmente em relação a suportabilidade destes. O filtro pode ser melhorado tanto na banda passante, pois nota-se que no circuito projetado a atenuação dos sinais inicia-se após 1 MHz, quanto na utilização de componentes SMD (capacitores e resistores) para melhor resposta em altas frequências.

Finalmente foram propostas duas configurações principais de medição de SFRA *on-line*. Configurações fase-fase e fase-neutro. Em ambas as configurações pode-se realizar ensaios com o transformador energizado. Entretanto, na configuração fase-neutro os resultados foram mais satisfatórios, visto que os sinais foram menos ruidosos que na outra configuração, não sendo necessária a aplicação de filtro digital nas respostas obtidas, e menos sensíveis às alterações de carga do sistema. Além disso, a configuração fase-neutro foi mais sensível às alterações nos enrolamentos, deflagrando uma melhor tendência na detecção de defeitos envolvendo a parte ativa do transformador.

O estudo das alterações de cargas do sistema, por sua vez, foi inédito, pois outros autores não abordaram o tema em medições *on-line*. O que pode-se perceber é que as alterações de impedância equivalente do sistema certamente geram mudanças nas respostas da função transferência de transformadores energizados. No entanto, recomenda-se que tais alterações sejam incorporadas como histórico do equipamento, gerando assim um banco de dados com várias curvas características, e não apenas a resposta considerando o sistema energizado, inicialmente proposta. Assim, a cada solicitação do sistema (faltas, sobretensões e etc) o ensaio deve ser realizado e comparado com um banco de dados, considerando várias condições de impedância equivalente do sistema, de modo que não sejam geradas conclusões errôneas à cerca do ensaio.

Por fim, através da análise dos testes experimentais, recomenda-se a padronização da topologia do sistema interligado (através de manobras da subestação na qual o transformador está alocado). Além disso, notou-se, durante a realização dos ensaios, significativa sensibilidade dos resultados em relação aos componentes do circuito, tais como alterações de aterramento, comprimentos dos cabos e até direção dos sinais injetados, mostrando a necessidade de confecção de um sistema de medição fixo, ou seja, com circuito de proteção e cabos incorporados ao transformador, adaptando apenas o hardware de medição de SFRA.

A principal vantagem dos ensaios de SFRA *on-line* é de realizar ensaios com o transformador energizado, sem a necessidade de parada do equipamento e conseqüentemente redução de custos operacionais. Além disso, é uma técnica de diagnóstico em tempo real, aumentando a confiabilidade do sistema. Por outro lado, os ensaios *on-line* limitam a frequência de análise, eliminando a faixa de análise relativa ao núcleo (menos suscetíveis a falhas, conforme pode ser visto na Figura 7).

Somando-se a isso, nos ensaios *on-line* a sensibilidade das alterações de *set up* (cabos, aterramentos, etc) são maiores em relação às medidas *off-line* devido à influência dos *taps* na medição. Finalmente, os ensaios de SFRA *on-line* apresentam a desvantagem de atenuação dos sinais e amplificação de ruídos também devido à influência dos divisores capacitivos da bucha e interferências eletromagnéticas presentes em medições envolvendo altas tensões.

De maneira geral, no entanto, pode-se dizer que os estudos de proposta de metodologia para medição de resposta em frequência em transformador energizado foram satisfatórios. Contudo, a aplicação dos estudos *on-line* não substituem os ensaios *off-line*, mas sim os complementam auxiliando a tomada de decisões.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A continuidade desses estudos é, principalmente, em relação à aplicação desses ensaios em transformadores alocados em subestações de geração ou interligação para validação do método em situações reais, ou, aplicação do método em um transformador que possa ter seus parâmetros variados (curto entre espiras, deslocamento das bobinas, etc), o que é difícil de se conseguir na prática.

Também podem ser implementados filtros de amplificação dos sinais injetados para aumentar a relação sinal ruído, além de melhoramentos dos circuitos de proteção, através da introdução de componentes SMD.

Outra continuidade do trabalho é com relação a utilização de técnicas de classificação de defeito das respostas obtidas, tais como aplicação de análises de correlação e aplicação de algoritmos para classificação das respostas obtidas para auxílio na tomada de decisões.

Paralelamente, o estudo de modelos abertos, ou modelos caixa cinza do transformador com objetivo de introduzir variações dos parâmetros RLC internos para validação com resultados de medição de resposta em frequência em transformadores *on-line* talvez seja o maior desafio para continuidade deste tema.

APÊNDICE 1 - RESULTADOS DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PELO MÉTODO NORMALIZADO

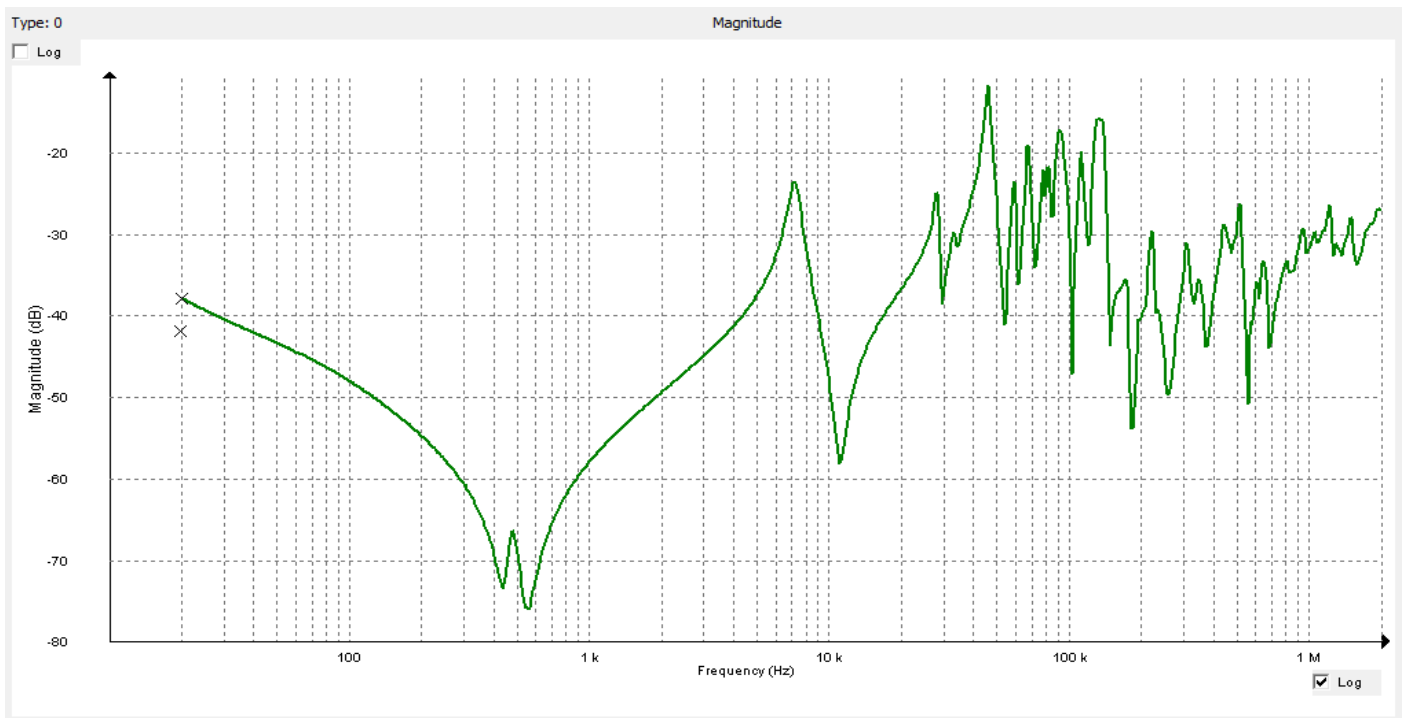


Figura 62. Resposta em Frequência – Configuração 1

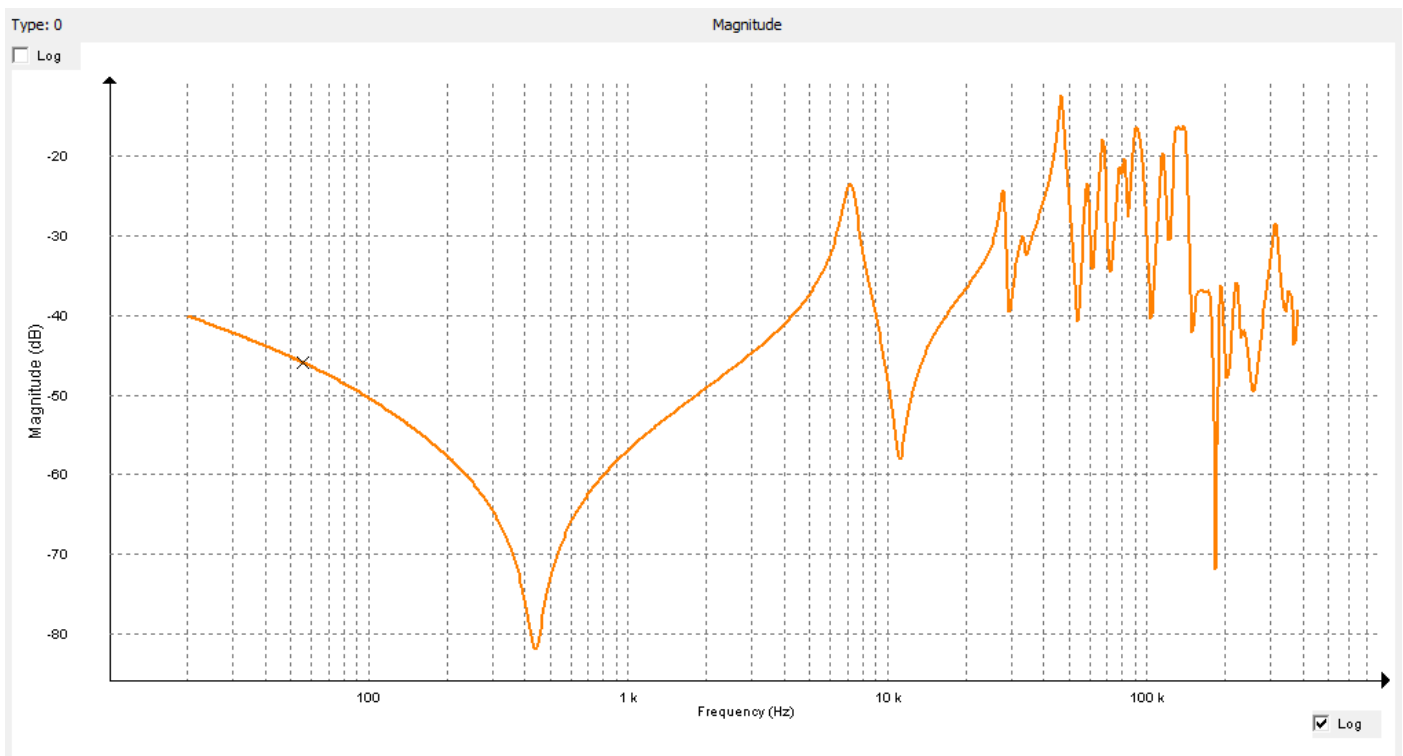


Figura 63. Resposta em Frequência – Configuração 2

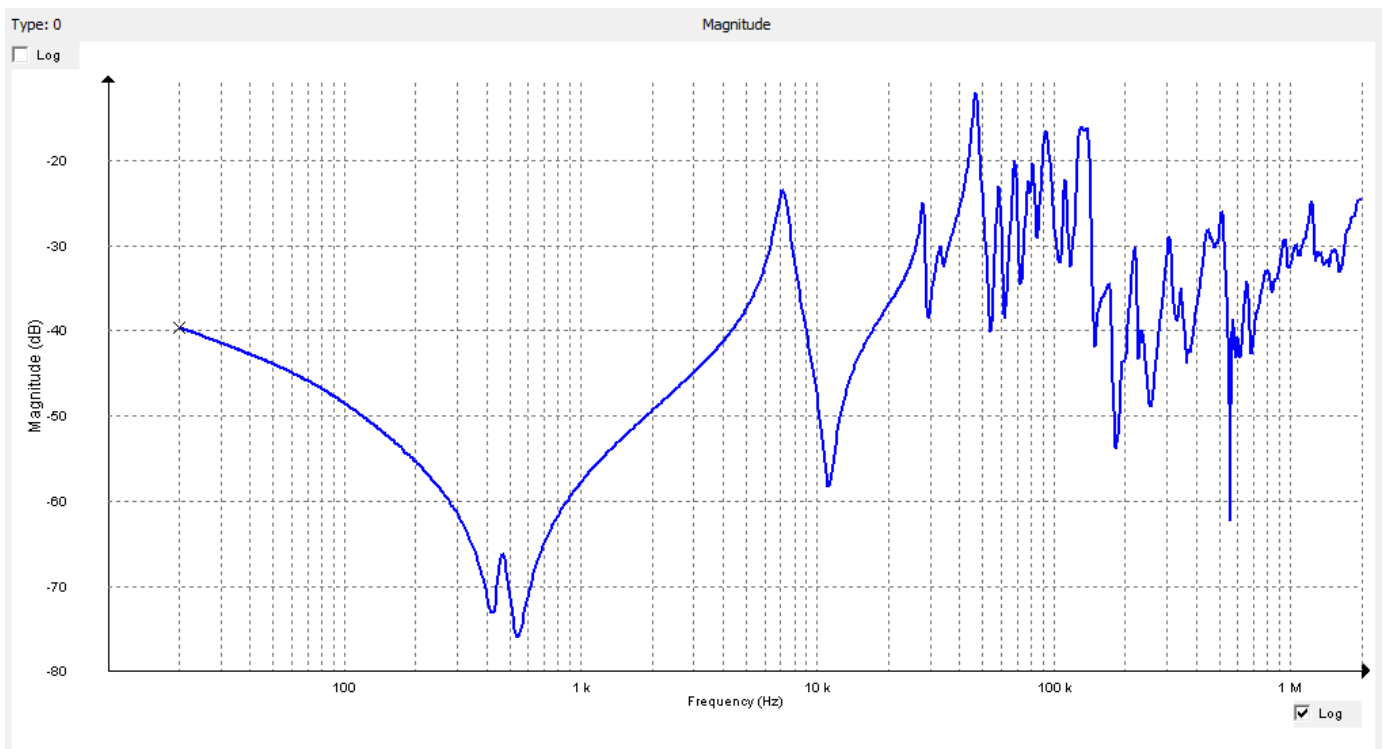


Figura 64. Resposta em Frequência – Configuração 3

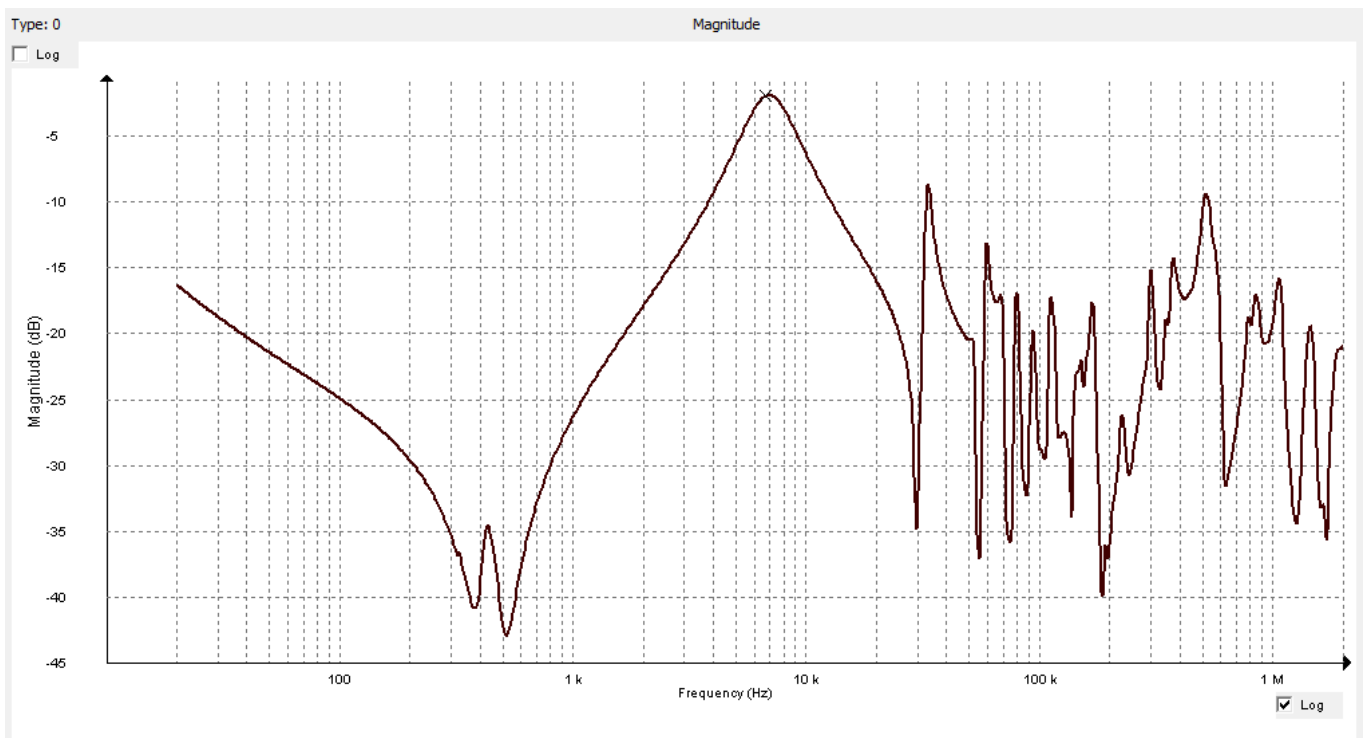


Figura 65. Resposta em Frequência – Configuração 4

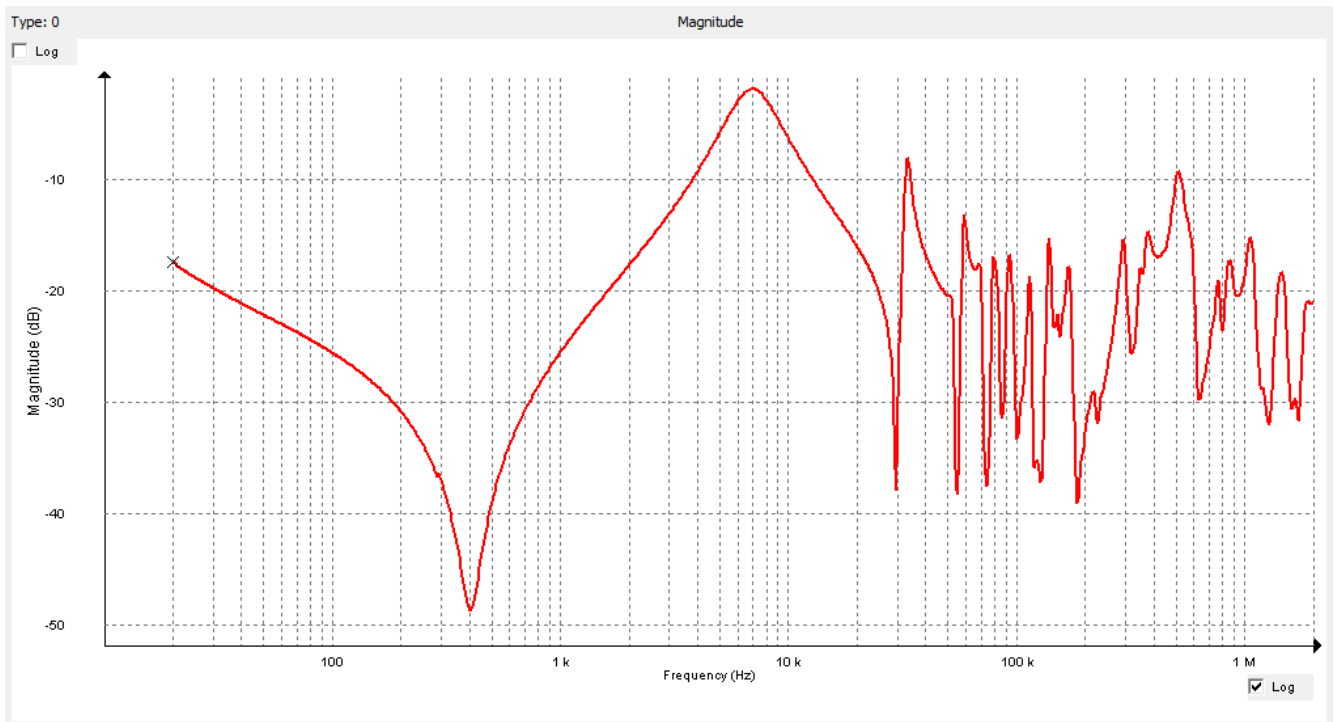


Figura 66. Resposta em Frequência – Configuração 5

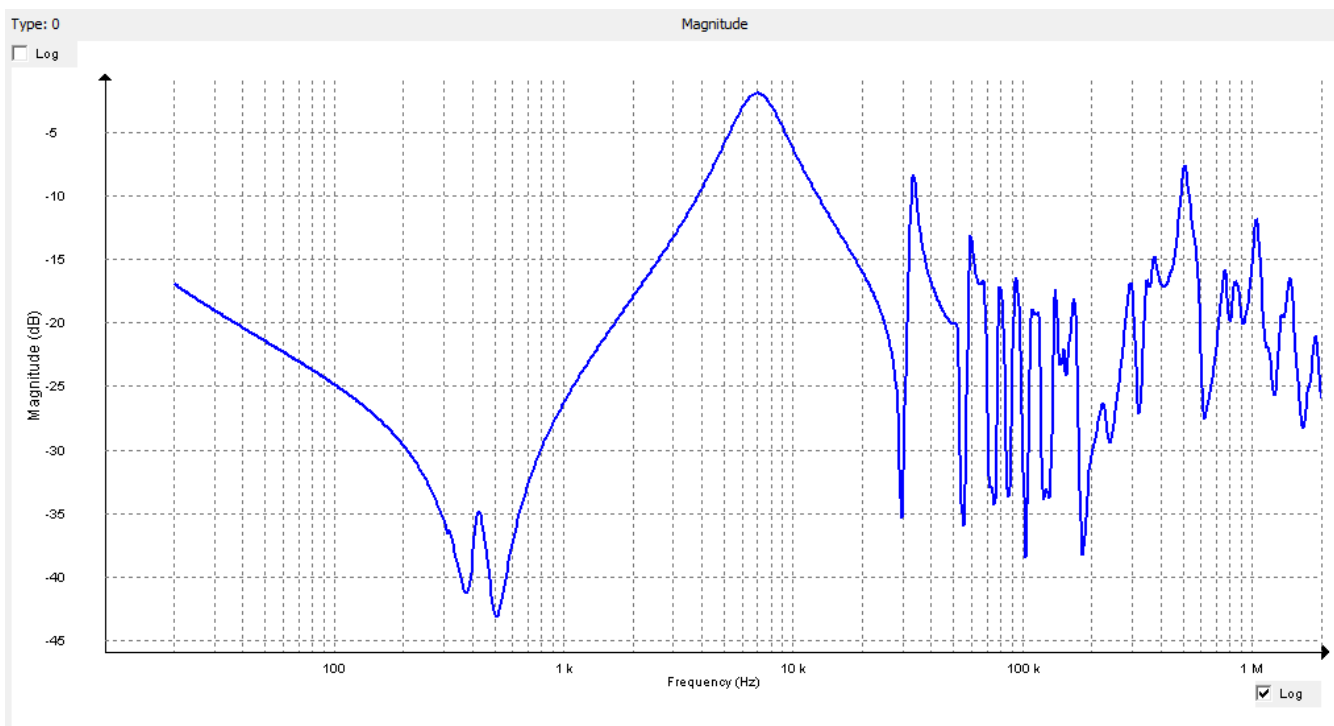


Figura 67. Resposta em Frequência – Configuração 6

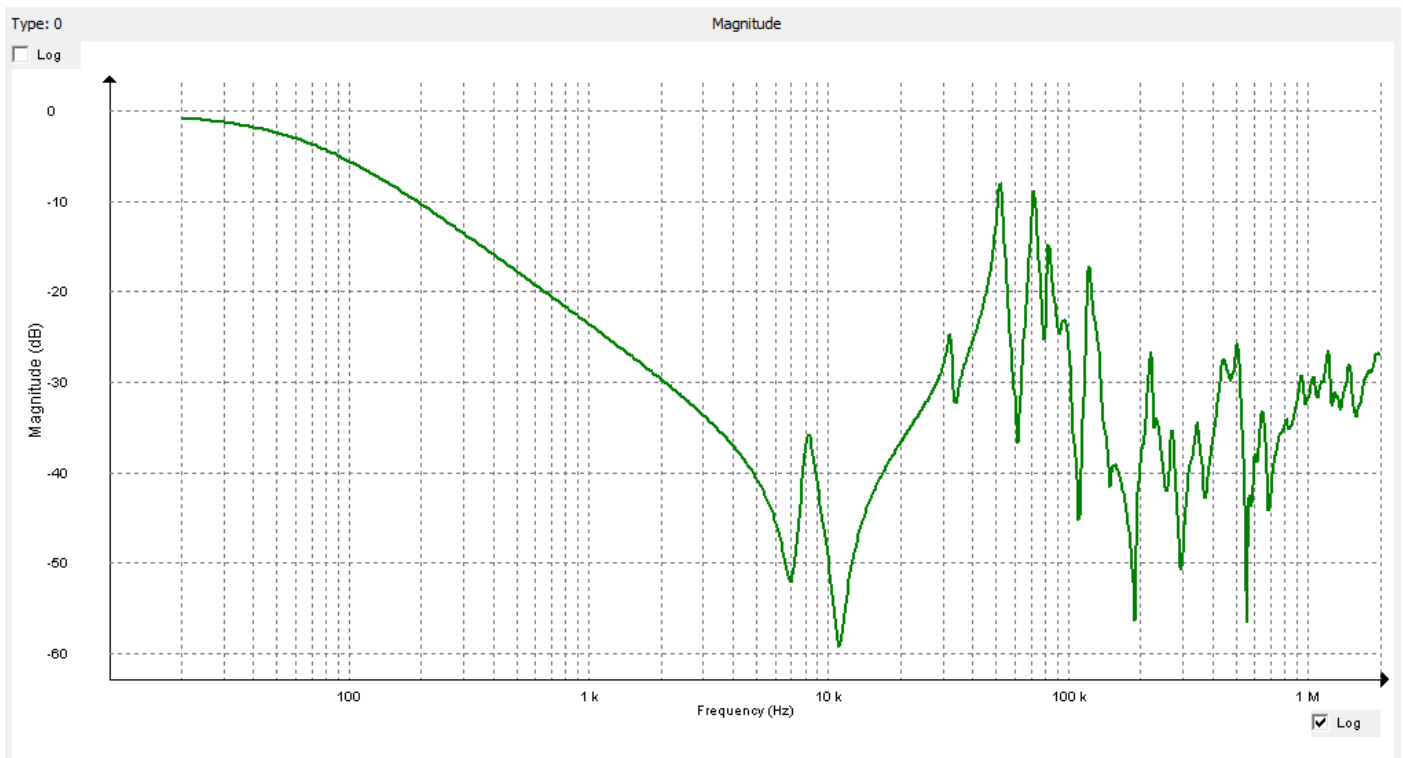


Figura 68. Resposta em Frequência – Configuração 7

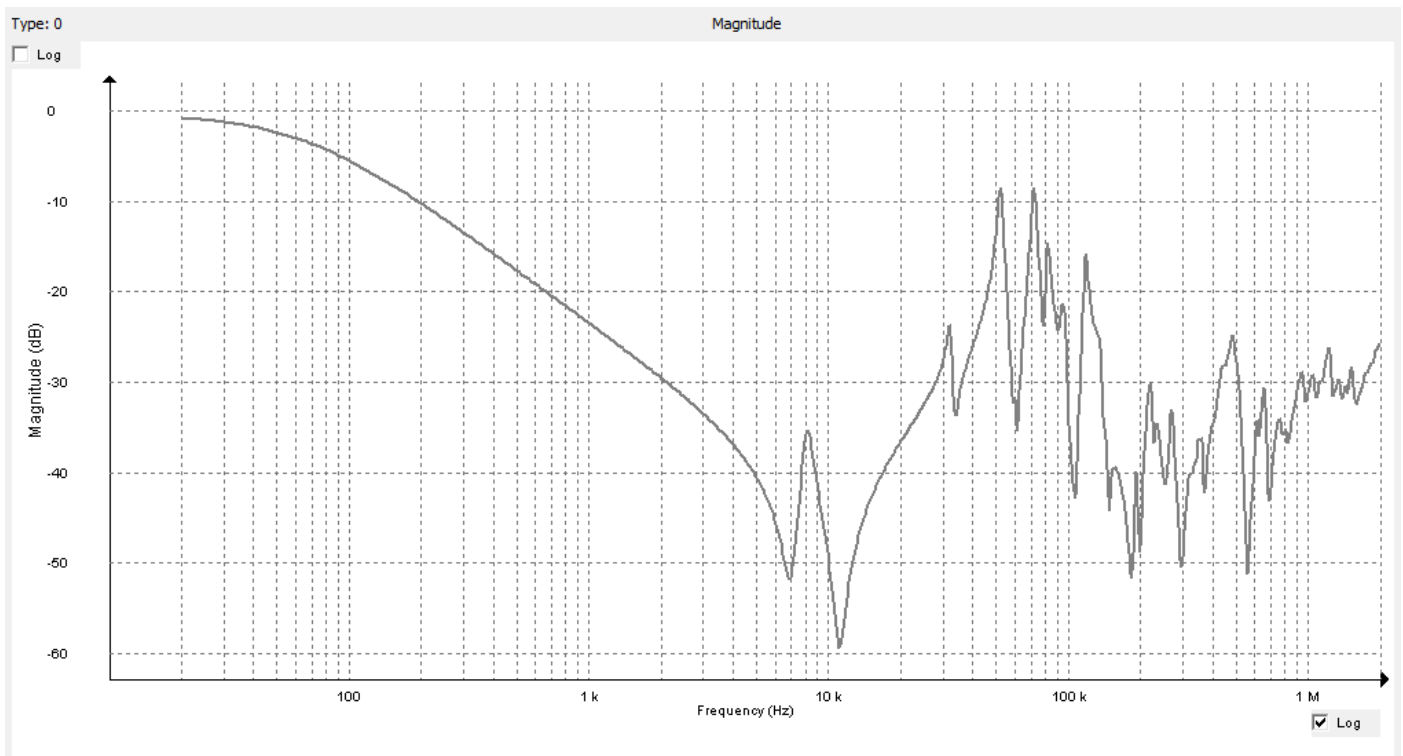


Figura 69. Resposta em Frequência – Configuração 8

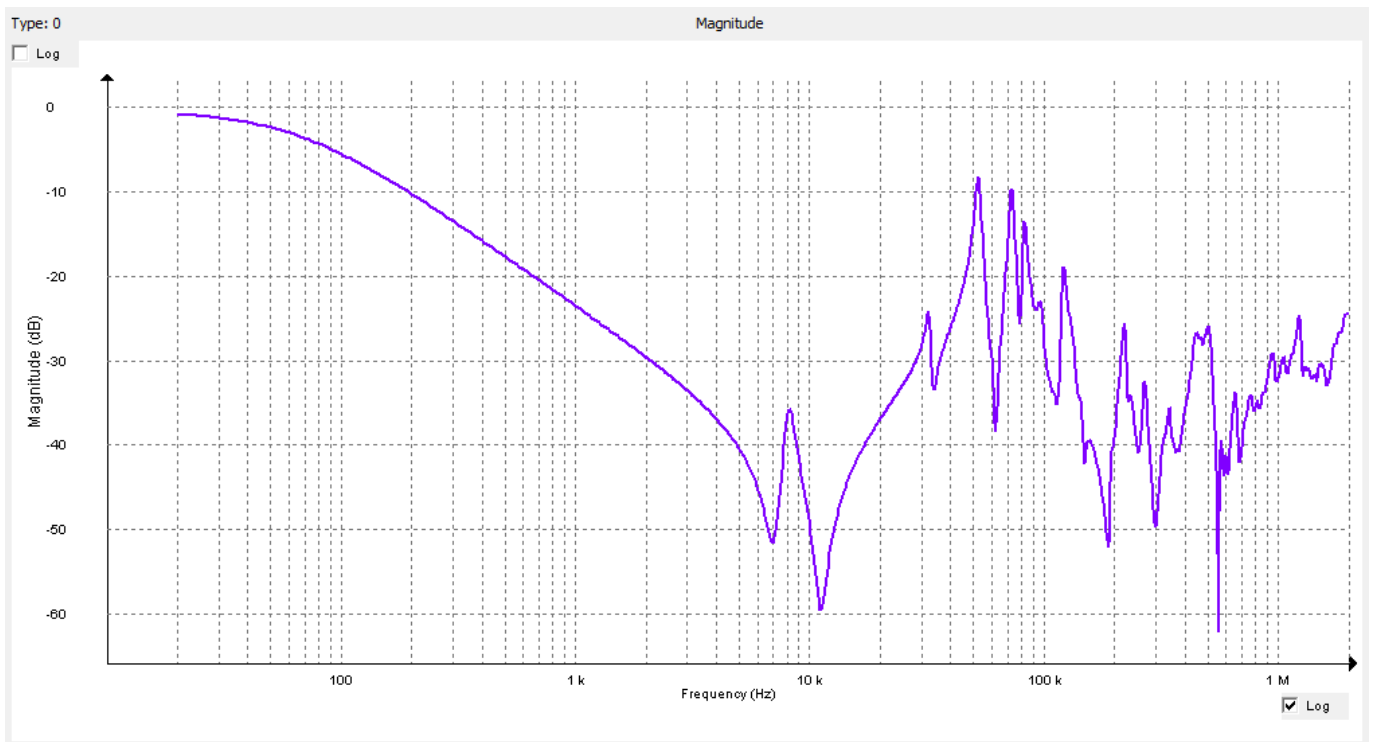


Figura 70. Resposta em Frequência – Configuração 9

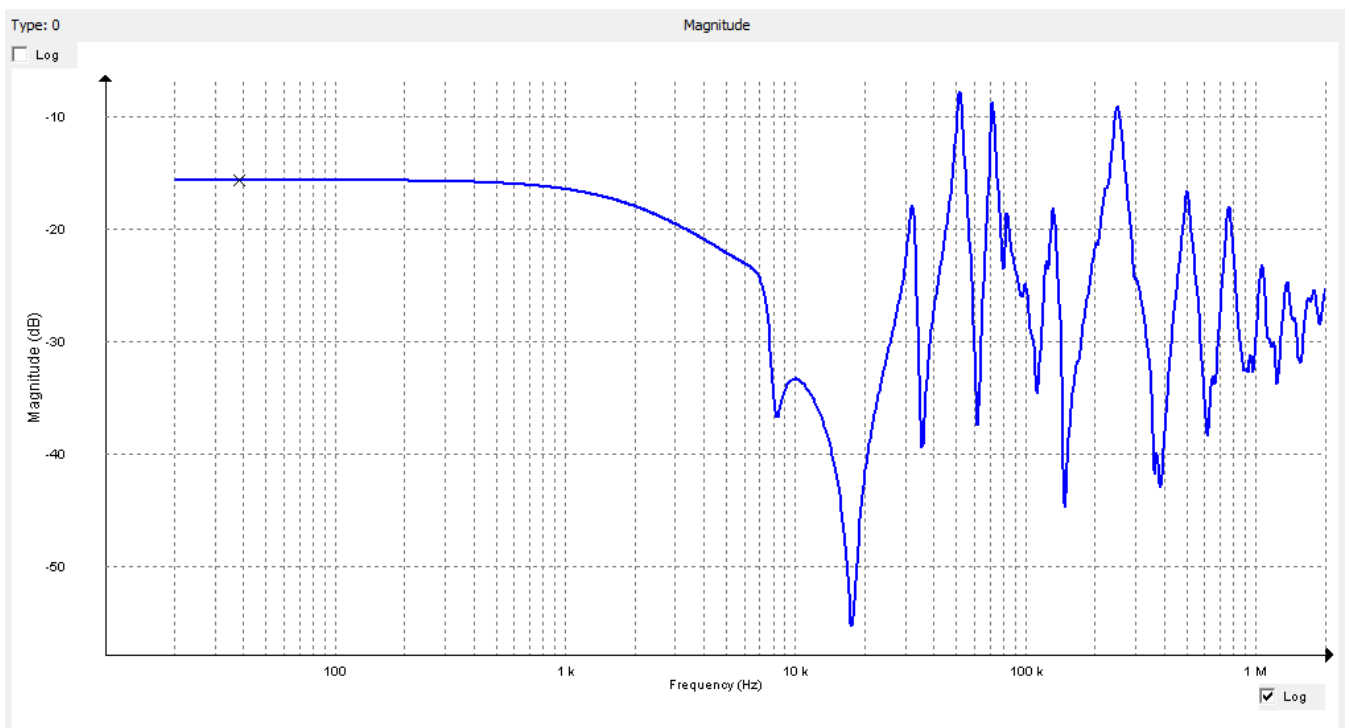


Figura 71. Resposta em Frequência – Configuração 10

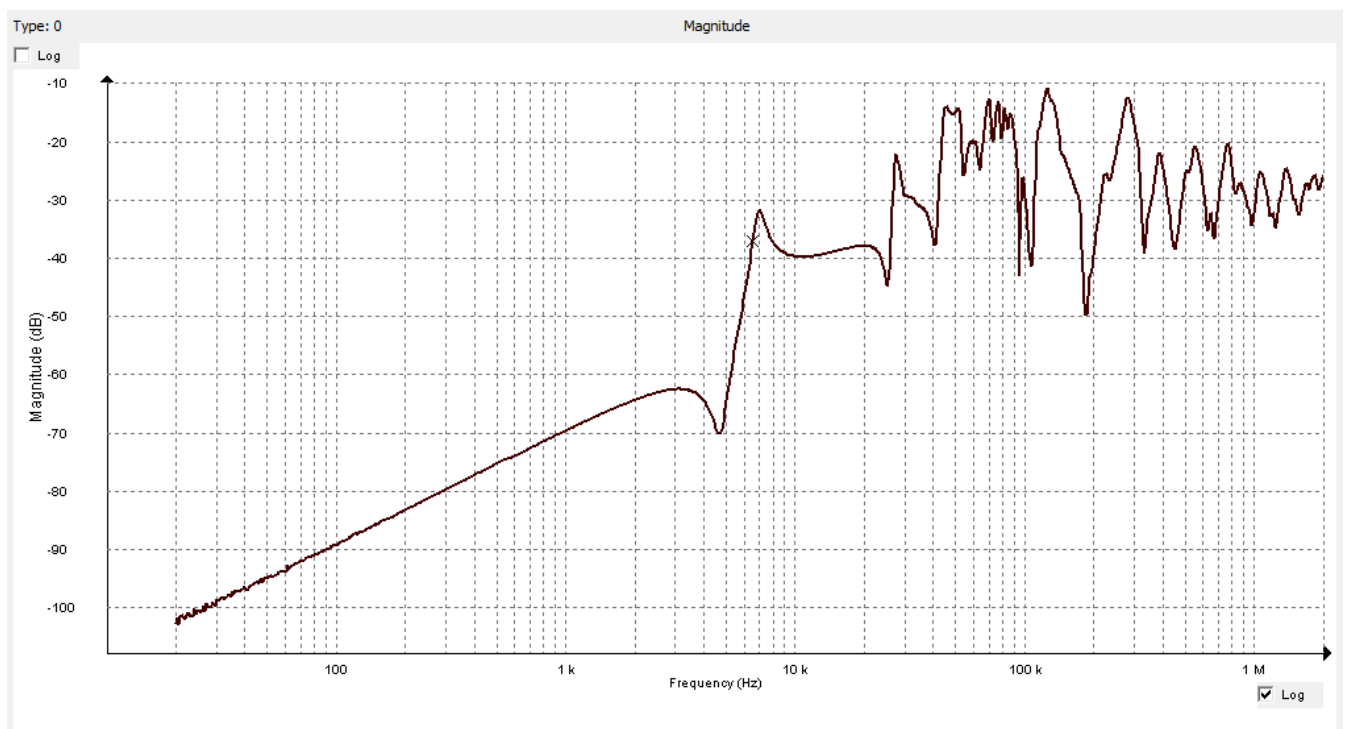


Figura 72. Resposta em Frequência – Configuração 11

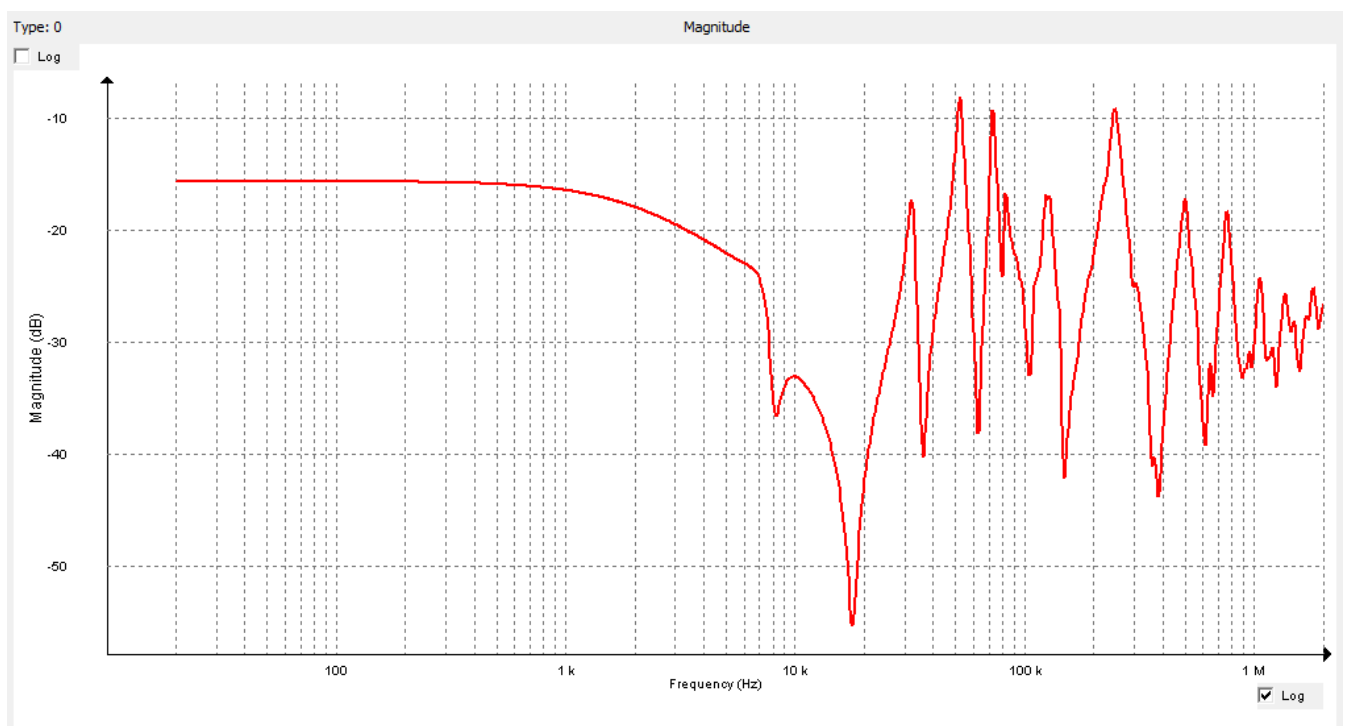


Figura 73. Resposta em Frequência – Configuração 12

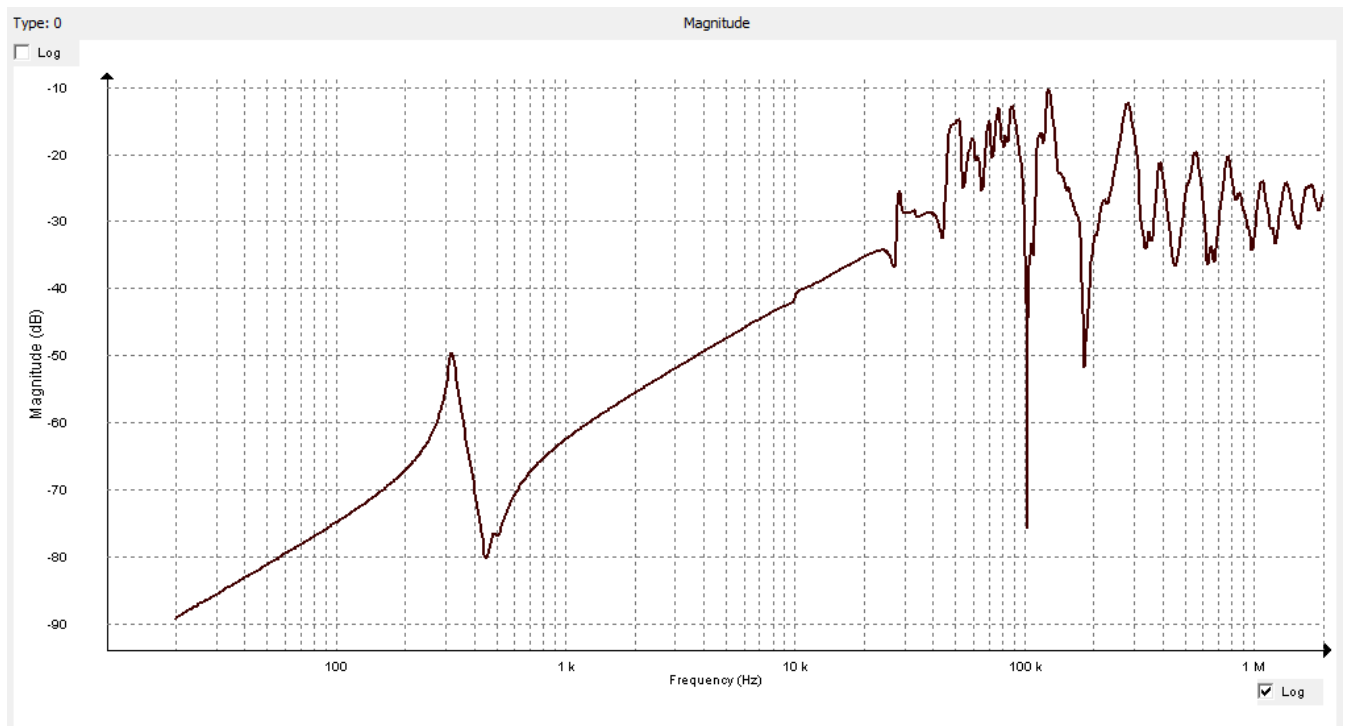


Figura 74. Resposta em Frequência – Configuração 13

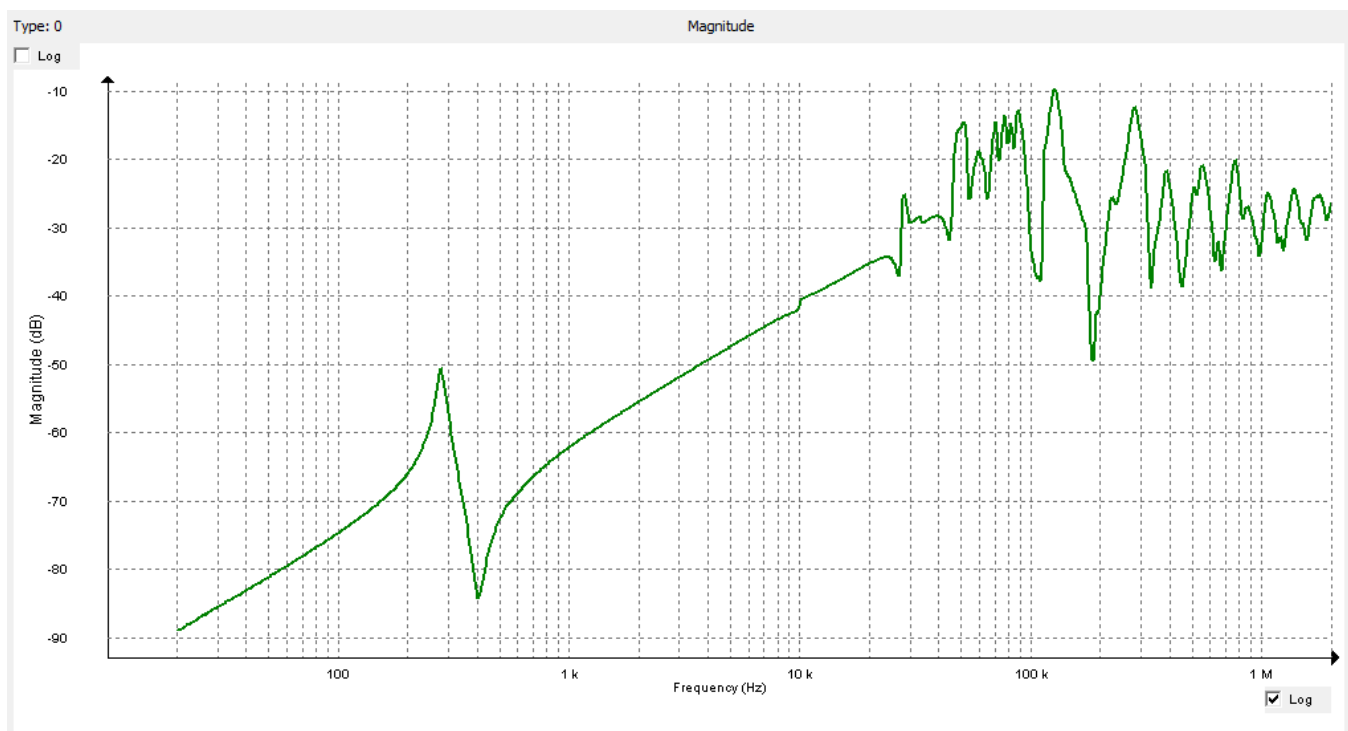


Figura 75. Resposta em Frequência – Configuração 14

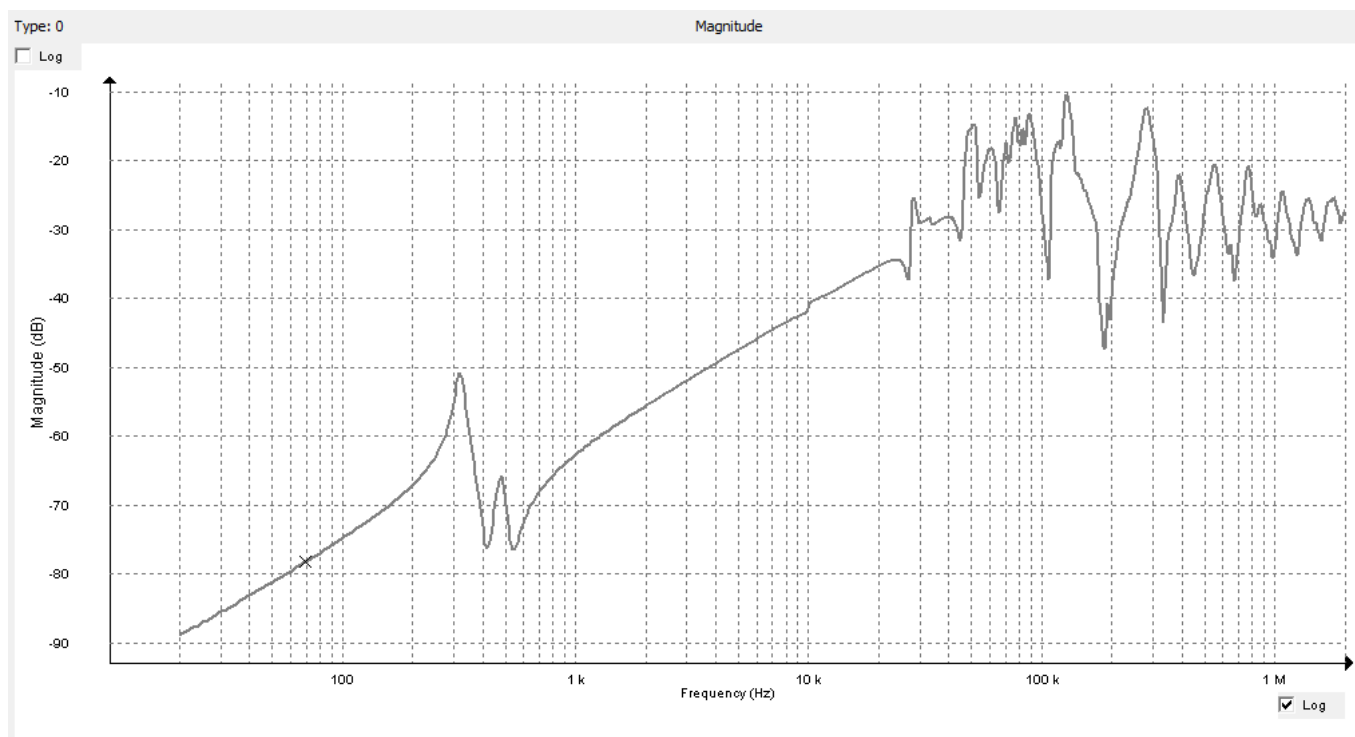


Figura 76. Resposta em Frequência – Configuração 15

ANEXO 1 – DIGRAMA UNIFILAR DE SUBESTAÇÃO DOS INSTITUTOS LACTEC

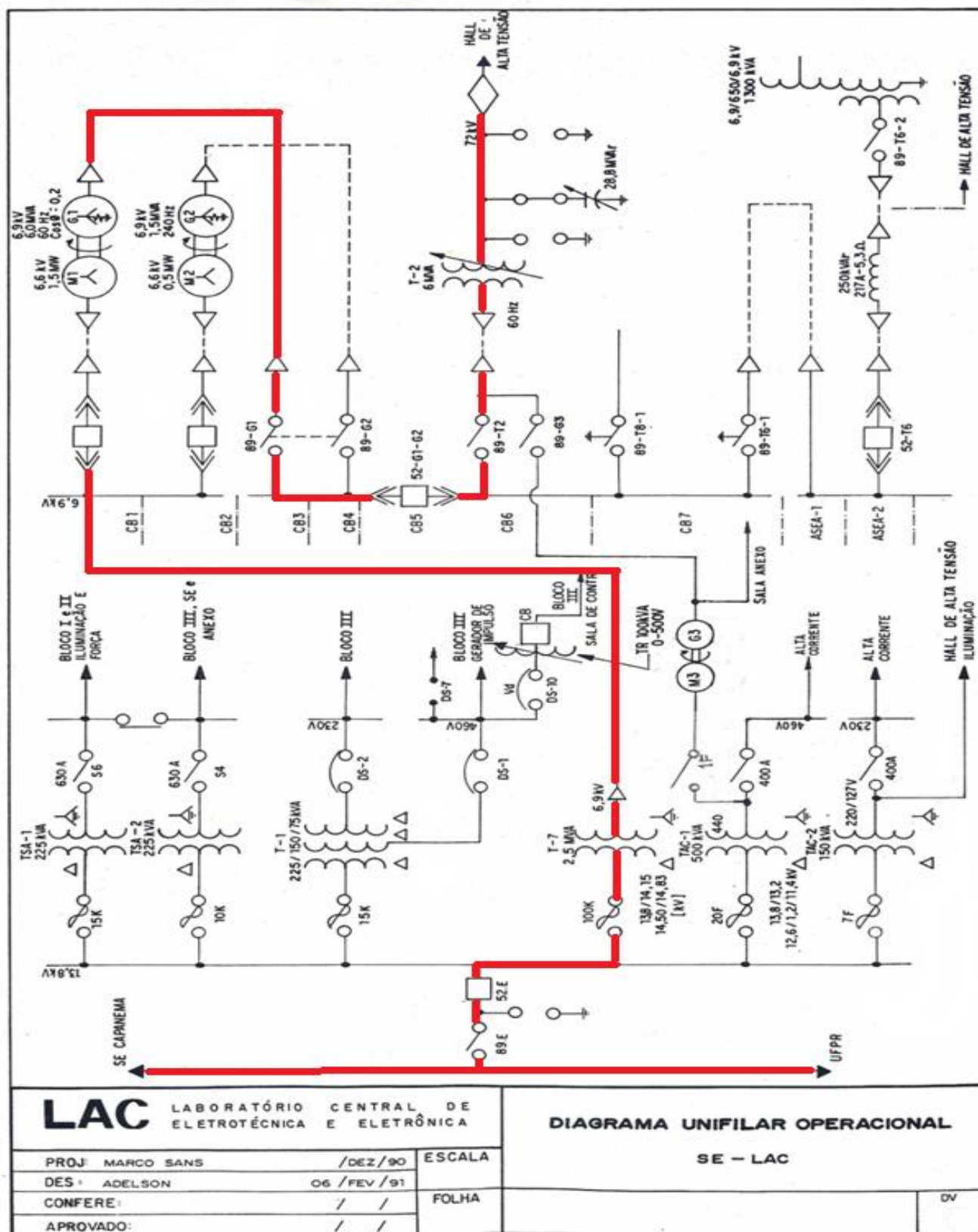


Figura 77. Diagrama Unifilar da Subestação do Lactec – Circuito de Energia do Transformador T-2 de 6 MVA

REFERÊNCIAS

ABDO, J. M. **Resolução Normativa No 63** Brasília ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, , 2004.

AGILENT. **Impedance Measurement Handbook** Agilent Technologies Section 5, , 2003.

AGUIAR, E. R. DE. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potência**. [s.l.] Univeridade Federal de Minas Gerais, 2007.

AGUIAR, R.; TEIXEIRA JUNIOR, J. A. Frequency Response Analysis ”, . **SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, v. 20, 2009.

BAGHERI, M. et al. **Practical challenges in online transformer winding deformation diagnostics** 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). **Anais...** Sydney, Australia: IEEE, nov. 2011

BAK-JENSEN, J.; BAK-JENSEN, B.; MIKKKELSEN, S. D. Detection of Faults and Ageing Phenomena in Transformers by Transfer Functions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 1, p. 308–314, 1995.

BEHJAT, V. et al. Diagnosing Shorted Turns on the Windings of Power Transformers Based Upon Online FRA Using Capacitive and Inductive Couplings. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 4, p. 2123–2133, out. 2011.

CARVALHO, A. C. C. DE; MENDES, J. C.; CORREIA, D. DE M. Transformadores de Potência. In: GOYA (Ed.). **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1a. ed. Brasília: [s.n.]. p. 158–276.

COFFEEN, L. et al. **A Summary of NEETRAC On-line Frequency Response Analysis (FRA) a New EPRI Commercial Prototype FRA Installation at First Energy** San Antonio, TX, 2009.

COFFEEN, L.; MCBRIDE, J.; CANTRELLE, D. **Initial Development of EHV Bus Transient Voltage Measurement: An Addition to On-line Transformer FRA** Orlando, FL, 2008.

COFFEEN, L.; MCBRIDGE, J.; KANE, C. **On-line Frequency Response Analysis (OLFRA) with Application on Transformer End-of-life Predictive Maintenance (PdM)** Predictive Maintenance Conference. **Anais...** South Africa: 2011

Como a “rede” é hoje? Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2009/08/11/rede-inteligente-por-que-como-quem-quando-onde/>>. Acesso em: 27 abr. 2014.

DICK, E. P.; ERVEN, C. C. Transformer Diagnostic Testing by Frequency Response Analysis. **IEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-97, n. 6, p. 2144–2153, 1978.

FESER, K. et al. **The Transfer Function Method for Detection of Winding Displacements on Power Transformers after Transport, Short Circuit or 30 Years of Service** Cigrè Stuttgart Haefely, , 2000.

FRONTIN, S. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1a. ed. Brasília: [s.n.]. p. 934

GILL, P. **Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**. 2a. ed. Boca Raton: CRC Press, 1941. p. 164–168

GILLIES, D. A.; HUMBAR, L. E.; ROGERS, E. J. Bonneville Power Administration Transformer Short Circuit Test Results - Comparison of Winding Inspection with Diagnostic Methods. **IEEE Power Engineering Society**, v. T 72, n. 597-3, p. 934–942, 1972.

IEC 60076-18. **Power Transformers - Part 18: Measurement of Frequency Response** Switzerland IEC, , 2012.

IEEE PC57.149/D5. **Draft Trial - Use Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers** Piscataway IEEE, , 2012.

KENNEDY, G. M.; MCGRIL, A. J.; LAPWORTH, J. A. **Using Cross-Correlation Coefficients to Analyze Transformer Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Traces** IEEE Power Engineering Society. **Anais...** Johannesburg: 2007

KOJIMA, H. et al. Buckling Strength Analysis of Large Power Transformer Windings Subjected to Electromagnetic Force Under Short Circuit. **IEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 3, 1980.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARTINS, H. J. A. **Diagnóstico de Transformadores de Potencia através de Metodologias no Domínio da Frequência**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

NBR 5356-1. **Transformador de Potência, Parte 1: Generalidades** Rio de Janeiro ABNT, , 2008.

NOONAN, T. J. **Power Transformer Condition Assessment and Renewal, Frequency Response Analysis Update** Double Conference Proceedings, 64PAIC97. **Anais...** Boston: 1997

PAULINO, M. E. DE C. Capítulo II - Repetibilidade dos resultados de SFRA. **Revista O Setor Elétrico**, p. 44–52, 2009.

PICHER, P. et al. **Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA)** Working Group A2.26 Cigrè, , 2008.

RYBEL, T. DE et al. Apparatus for Online Power Transformer Winding Monitoring Using Bushing Tap Injection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 996–1003, 2009.

RYDER, S. A. **Diagnosing Transformer Faults Using Frequency Response Analysis**IEEE Electrical Insulation Conference. **Anais...**Saint-Ouen: 2003

SETAYESHMEHR, A. et al. A Procedure for Diagnosis and Condition based Maintenance for Power Transformers. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, p. 19–22, 2004.

SETAYESHMEHR, A. et al. **On-line Monitoring of Transformer via Transfer Function**IEEE Electrical Insulation Conference. **Anais...**Montreal, Canada: IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009

SOARES, J. C. **Transformador de potência - Apostila**CurtibaCOPEL - Departamento de Operação e Manutenção da Geração, , 2010.

SOYSAL, O. A Method for Wide Frequency Range Modeling of Power Transformers and Rotating Machines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 4, 1993.

TENBOHLEN, S. **Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods**XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. **Anais...**Rotterdam: 2003

VAESSEN, P. T. M.; HANIQUE, E. A new frequency response analysis method for power transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, p. 384–391, 1992.

VANDERMAAR, A. J.; WANG, M. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service. **Vol 18, No. 6**, p. 12–25, 2002.

WADHWA, C. L. **High Voltage Engineering**. Second Edi ed. New Delhi: [s.n.]. p. 156–256

WAGENAAR, L. B. Electrical Bushings. In: HARLOW, J. (Ed.). **Electric Power Transformer Engineering**. 9a. ed. Boca Raton: LLC, 2004. p. 251–273.

WANG, Z. et al. Interpretation of Transformer FRA Responses — Part I: Influence of Winding Structure. v. 24, n. 2, p. 703–710, 2009.

XU, D. K.; FU, Z. F.; LI, Y. M. **Application of Atificail Neural Network to the Detection of the Transformer Winding Deformation**High Voltage Engineering Symposium. **Anais...**London: 1999