

Ferrorressonância Em Transformadores de Potencial Devido às Distorções Harmônicas na Rede de Distribuição

Tema: Qualidade de Energia

Autores: Luiz Gustavo Pieve Nunes

Co-Autores: William Thiago Agostinho Nascimento; Fernando Ribeiro Eufrosino da Silva

Empresa: -

Resumo

Os indicadores de qualidade de energia elétrica são extremamente importantes para que as medições de tensão sejam confiáveis, de maneira que relés e medidores possam operar adequadamente. Outro problema que tem se tornado cada vez mais comum no contexto de média e baixa tensão é o efeito da ferrorressonância devido às componentes harmônicas próximas à frequência natural de ressonância (assinatura em frequência) dos transformadores de potencial indutivo (TPI). Para isto, deve-se realizar mudanças no projeto das bobinas primárias dos TPIs com a intenção de alterar os valores das capacitâncias parasitas do equipamento, em especial, a capacitância de surto, de forma que a frequência natural de ressonância seja muito maior do que a frequência das componentes harmônicas que são mais presentes no sistema.

1. Introdução

As distorções harmônicas são objeto de estudo a mais de um século, o que foi motivado pelas distorções nos sinais de tensão e corrente que foram observadas a partir da saturação do núcleo ferromagnético de transformadores. Porém, com o avanço da tecnologia dos dispositivos de eletrônica de potência, por exemplo, houve um aumento de cargas não-lineares no sistema, o que ampliou significativamente as distorções harmônicas na rede devido ao chaveamento, além dos fornos a arco. [1]

Existem problemas também em pontos de acoplamento comum com a rede, uma vez que, dependendo da topologia da rede, fontes de geração de energia podem ser acopladas ao sistema de distribuição de maneira distribuída e este fator pode acarretar em distorções harmônicas que superem os valores determinados pelo Módulo 8 do PRODIST, a qual regulamenta o nível de distorções harmônicas na rede de forma que não haja prejuízos consideráveis para os equipamentos instalados na rede, como os transformadores de potencial indutivos. [2] [3]

Também, as distorções harmônicas provocam erros de medição que são maiores do que sua classe de exatidão, já que as tensões primárias apresentam distorções com frequências que podem levar o equipamento à saturação do seu núcleo, o que implica na perda de linearidade do equipamento e na posterior perda de exatidão do mesmo, o que implica em erros de medição que podem apresentar dados irreais de tensão além de fazer com que a proteção não atue devidamente. [4]

Do ponto de vista da frequência, deve ser feito o estudo de Resposta em Frequência do equipamento de forma que seja possível encontrar a frequência natural de ressonância do equipamento, já que é necessário

conhecer quais componentes harmônicas são potencialmente geradoras de erros de medição devido às condições de interferência eletromagnética e do fenômeno de batimento, o qual implica no fato de que, frequências próximas à frequência natural de ressonância do equipamento, podem promover o fenômeno de ferorressonância no transformador de potencial. Utiliza-se, como ferramenta de análise, a decomposição das formas de onda distorcidas utilizando a Série de Fourier, já que, pela própria definição de ressonância, o fenômeno de ressonância ocorre quando as frequências de tensão e corrente são próximas à frequência natural de ressonância do equipamento e podem favorecer o surgimento do fenômeno de ferorressonância devido à não-linearidade do núcleo ferromagnético. [5] [6] [7]

2. Desenvolvimento

I. Metodologia Para Determinação de Parâmetros

A. Determinação dos Parâmetros Para o Estudo

O primeiro passo para a execução do estudo foi a determinação dos parâmetros construtivos do equipamento, o que foi feito a partir da curva de saturação do equipamento, para que se possa utilizar os valores de indutância, resistência e capacitâncias parasitas para a modelagem do sistema no domínio da frequência.

B. Medições das Capacitâncias Parasitas

É importante mencionar que as medições de capacitância são muito difíceis de se obter devido à sensibilidade necessária para que os equipamentos possam ler os valores da corrente de fuga que surgem devido à tensão de excitação das bobinas, entretanto, os passos a seguir, apresentam a metodologia para as medições das capacitâncias parasitas do equipamento.

Antes de mais nada, deve-se curto-circuitar todos os terminais do equipamento, isto é, deve-se conectar, por meio de um fio, os terminais H0 e H1 e conectar, também por um fio, os terminais X1 e X2 a fim de que seja realizado o curto-circuito nos terminais do equipamento.

· Cpt: Capacitância do Primário Contra o Terra (Capacitância de Surto)

Para as medições da capacitância do primário contra a terra, deve-se excitar o terminal H1 (ou H0) e ler a corrente de fuga na base (massa) do TPI.

· Cps: Capacitância do Primário Contra o Secundário

Para as medições da capacitância do primário contra o secundário, deve-se excitar o equipamento pelo primário e ler a corrente no secundário.

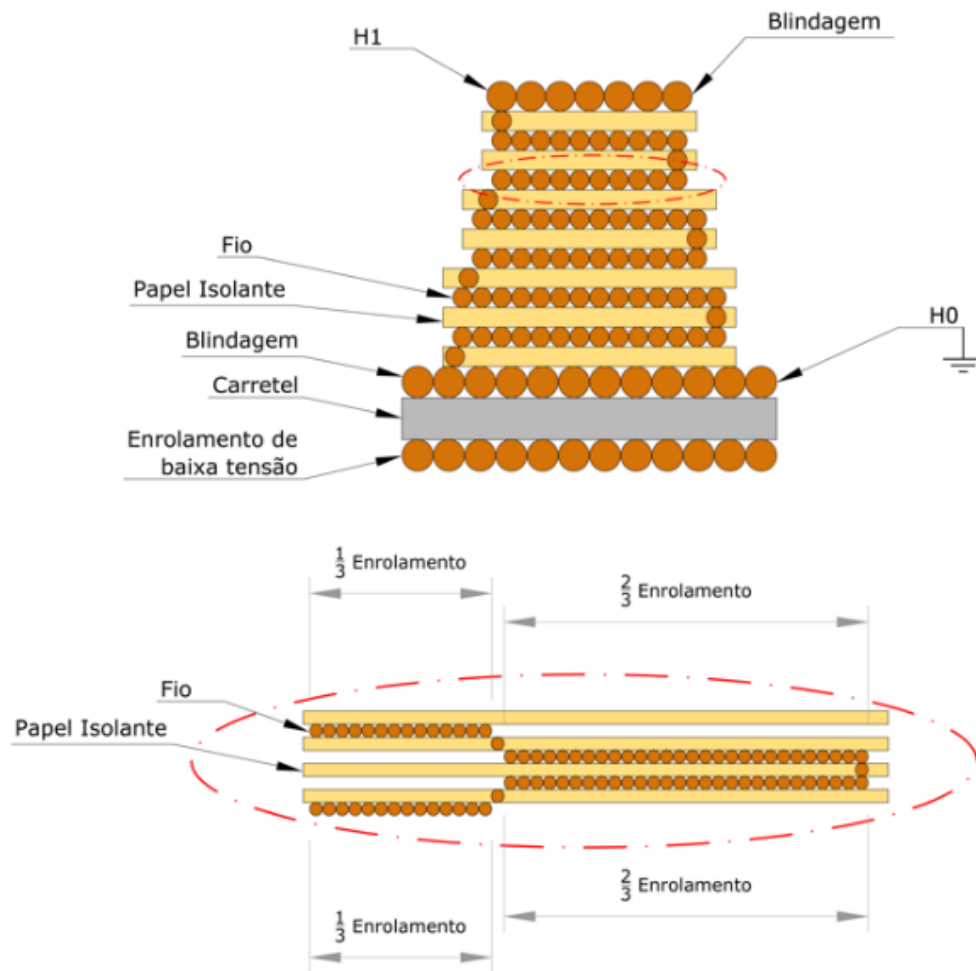
· Cst: Capacitância do Secundário Contra a Terra

Para as medições da capacitância do secundário contra a terra, deve-se excitar o equipamento no secundário e ler a corrente de fuga na base (massa) do equipamento.

C. Geometria das Bobinas do Enrolamento Primário

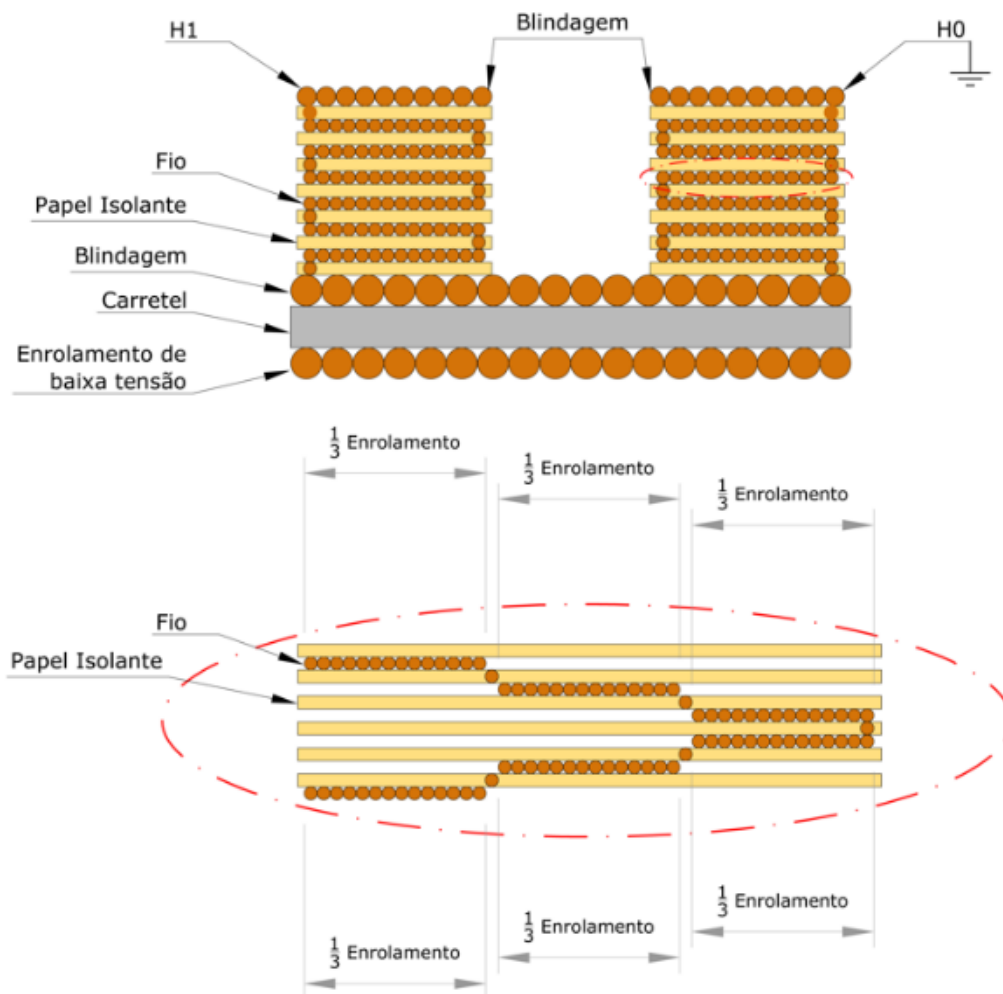
A Figura 1 e a Figura 2 apresentam, respectivamente, o esquema da geometria da bobina primária do projeto antigo e do projeto novo.

Figura 1 – Geometria da bobina do enrolamento primário do projeto antigo.



Pela observação da Figura 1, há apenas uma bobina primária, onde a isolação é feita a distribuição do enrolamento como sendo $\frac{1}{3}$ do enrolamento feito e, ao isolar com papel, é feito os outros $\frac{2}{3}$ do enrolamento em cima da primeira parte do enrolamento, o que forma as camadas do enrolamento da bobina primária. A grande dificuldade neste tipo de geometria é que o gradiente de tensão não é distribuído uniformemente o que pode implicar em variações de tensão internamente às camadas do equipamento, já que pode surgir diferenças de potencial entre as espiras do equipamento (ou até mesmo entre as camadas) quando ocorrem eventos transitórios na rede, como chaveamentos e manobras devido às contingências da rede. Outro fator importante é que, em termos de capacitâncias parasitas, a capacitância de surto (C_{pt}) deste tipo de geometria é muito alta, o que mantém o valor da frequência natural de ressonância muito abaixo do que é necessário para que não haja problemas de ferorressonância quando ocorrem distorções harmônicas na rede, o que é cada vez mais comum em termos de sistema elétrico.

Figura 2 – Geometria da bobina do enrolamento primário no projeto novo.



No caso do segundo projeto, o enrolamento primário foi feito com duas bobinas e o enrolamento de cada bobina foi dividido igualmente, de forma que o gradiente de tensão entre as camadas pudesse ser distribuído uniformemente nas camadas do enrolamento primário.

Este tipo de solução tem como objetivo o de promover melhores distribuições de elevações transitórias de tensão que possam ocorrer no equipamento, a fim de garantir melhor suportabilidade do equipamento frente aos transitórios de tensão que surgem na rede devido a manobras externas ou até mesmo eventos inesperados, como religamentos ou manobras com disjuntores.

Do ponto de vista das capacitâncias, a capacitância de surto (C_{pt}) diminui consideravelmente neste tipo de geometria, já que, para esta geometria, a capacitância entre bobinas surge em série com as capacitâncias próprias de cada bobina apresentando valores significativos e, pela própria expressão da capacitância equivalente, capacitâncias em série tem capacitância equivalente menor do que a capacitância da associação de capacitores.

Esta diminuição da capacitância de surto (C_{pt}) implica em um aumento considerável da frequência natural de ressonância do equipamento.

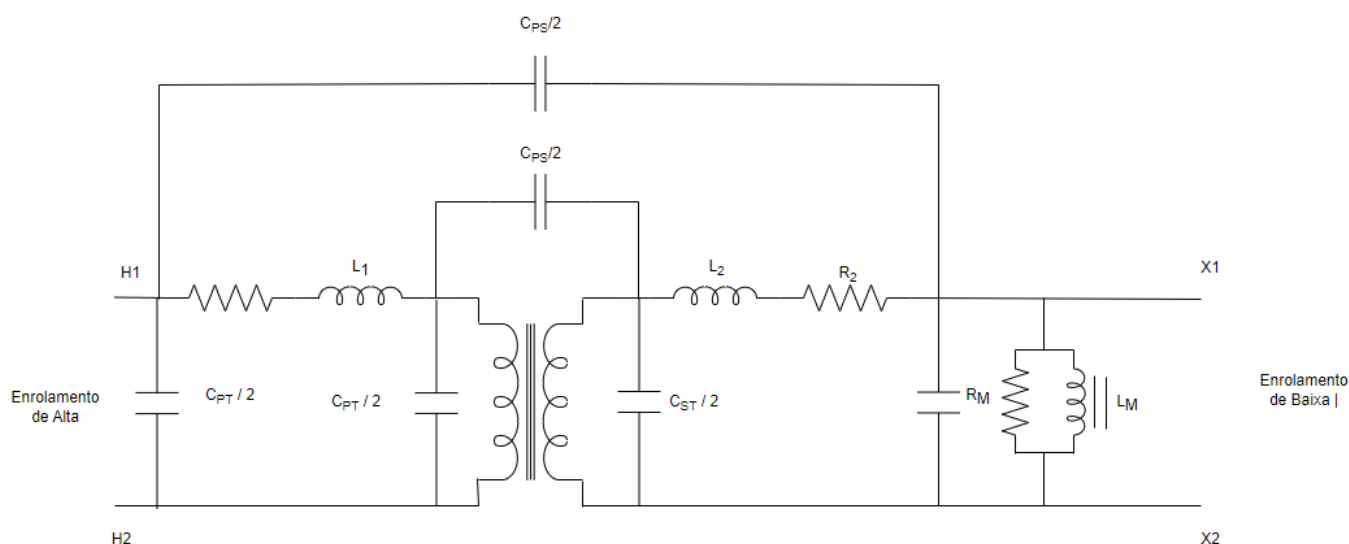
D. Modelo de Circuito Equivalente Com as Capacitâncias Parasitas

Para os estudos de resposta em frequência de um transformador, deve-se ter em mãos os valores das indutâncias dos enrolamentos e a indutância de magnetização, mas também é preciso ter os valores das capacitâncias parasitas do equipamento, as quais são extremamente difíceis de se obter de maneira analíti-

ca, por isto são feitas medições em laboratório para que seja possível ter acesso a esta informação, como já foi descrito na seção B.

Em relação ao modelo a ser utilizado neste estudo é apresentado na Figura 1 a seguir e apresenta uma modelagem para circuitos equivalentes de transformadores com suas capacitâncias parasitas representadas, além de seguir as recomendações previstas pelo ONS – Operador Nacional do Sistema para este tipo de estudo. [8] [9]

Figura 3 – Representação de circuito equivalente para simulação.



O circuito apresentado na Figura 3 é utilizado para uma faixa de frequências que varia de 100 Hz até 3 kHz.

F. Análise Dos Resultados

A partir do método de varredura da resposta em frequência, obtém-se um gráfico chamado Diagrama de Bode e este gráfico apresenta a relação, no domínio da frequência, entre a corrente no primário e a tensão no secundário, o que, após uma análise dimensional, observa-se que a função de transferência tem a grandeza de admitância, isto é, é medida em siemens.

Assim sendo, quando o ângulo de fase da função de transferência é zero e a admitância tem seu menor valor, pode-se concluir que ali será a frequência natural de ressonância (assinatura em frequência) do equipamento.

Em termos de exatidão, o ponto de menor admitância é onde ocorrerá o erro máximo na medição do transformador, o que também pode ser utilizado como critério para a análise da frequência natural de ressonância do equipamento.

É importante salientar que a determinação da função de transferência do equipamento é um processo extremamente oneroso e, com o auxílio do aparato computacional, é possível encontrar soluções que se provaram consistentes com a realidade, garantindo melhor condição de operabilidade e estabilidade em relação à segurança e as medições que devem ser realizadas pelo equipamento.

II. Estudo de Caso

A. Aspectos Construtivos dos TPIs

Para a realização deste estudo, são utilizados dois TPIs de mesmo modelo e mesmas características, entretanto, um apresenta apenas uma bobina no enrolamento primário e o outro apresenta duas bobinas no enrolamento primário, fator que impacta diretamente a capacitância de surto do equipamento (Cpt) e consequentemente na frequência natural de ressonância.

B. Parâmetros Construtivos

Os parâmetros construtivos do equipamento foram obtidos a partir do levantamento da curva de saturação dos equipamentos e os dados obtidos são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros construtivos dos dois TPIs utilizados para o estudo.

Parâmetro	Projeto Antigo	Projeto Novo
Resistência do enrolamento primário [ohms]	7070	9210
Resistência do enrolamento secundário [ohms]	0,118	0,505
Indutância do enrolamento primário [H]	54,04	9,39
Indutância do enrolamento secundário [mH]	0,000393	0,000310
Resistência de magnetização [ohms]	571,55	1540,01
Indutância de magnetização [H]	1,17	14,03
Capacitância do Primário contra a Terra [pF]	711,96	5,26
Capacitância do Secundário contra a Terra [pF]	7,6	27,5
Capacitância do Primário contra o Secundário [pF]	787,9	414,02

C. Implementação no Software de Simulação

Para a simulação do estudo de resposta em frequência, é utilizado o *software* TINA Texas Instruments, o qual apresenta funcionalidades que permitem aproximações confiáveis das medições em laboratório, além de ser mais intuitivo do ponto de vista operacional.

Os equipamentos utilizados foram dois transformadores de potencial indutivo (TPIs) de classe 36 kV e os dois equipamentos apresentavam características muito semelhantes, mudando apenas a geometria das bobinas do enrolamento primário para que se pudesse validar o estudo envolvendo as capacitâncias parasitas do equipamento.

Os dados dos equipamentos foram implementados no modelo da Figura 3 para a simulação, como estão mostrados a seguir na Figura 4 e na Figura 5 a seguir, respectivamente.

Figura 4 – Circuito do projeto antigo implementado no TINA Texas Instruments.

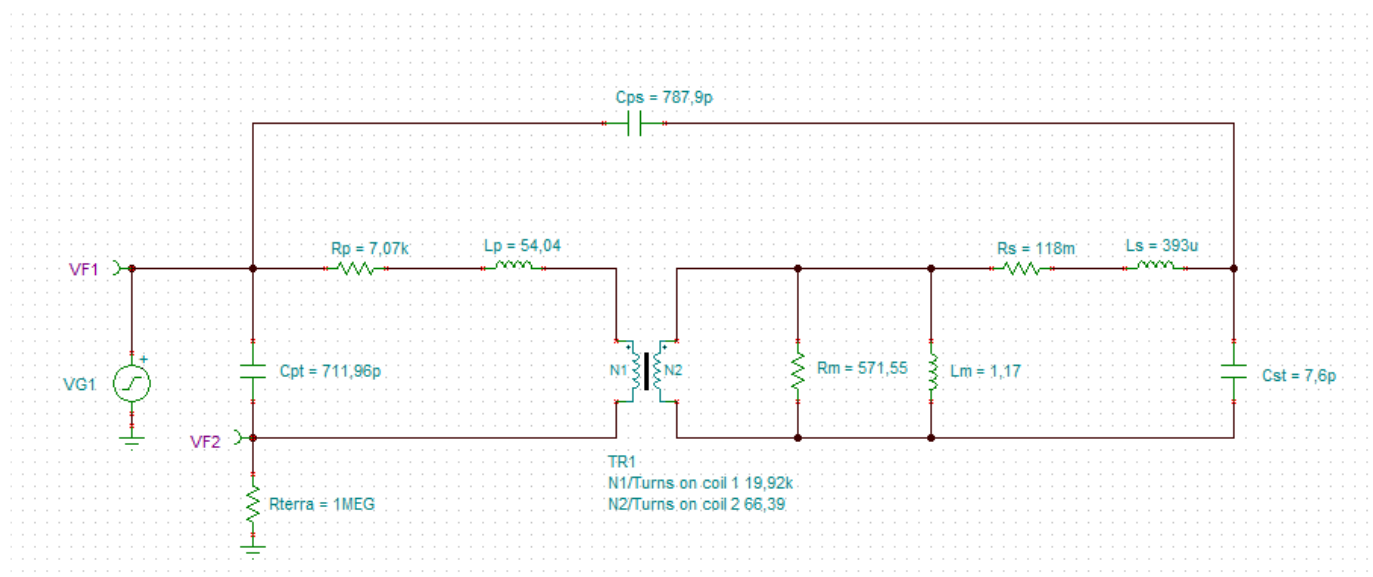
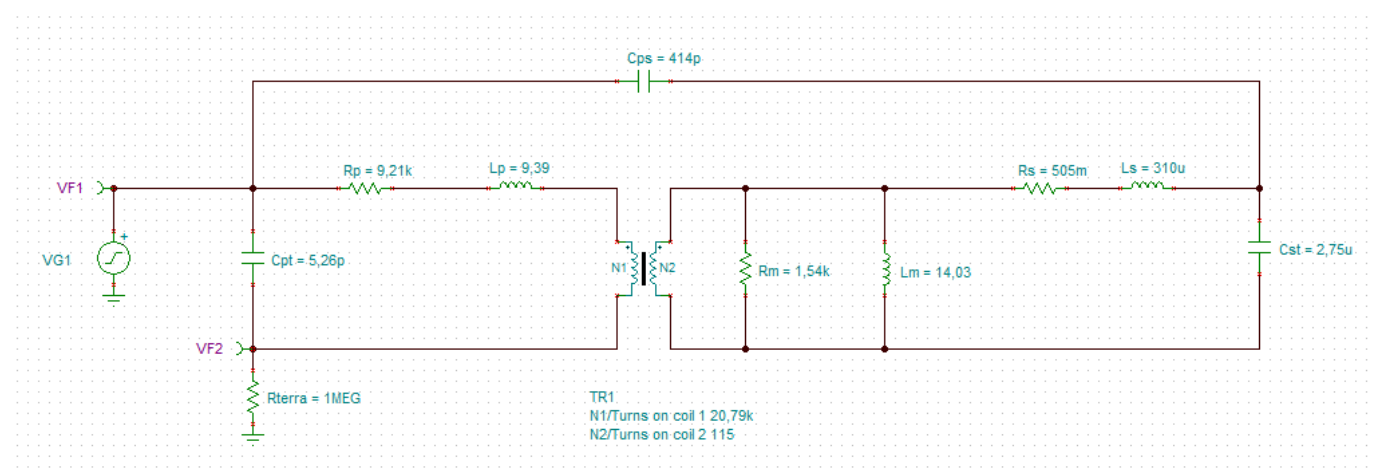


Figura 5 – Circuito do projeto novo implementado no TINA Texas Instruments.



D. Análise do Resultados Obtidos

As simulações fornecem a variação da admitância em função da frequência e, onde ocorre o ângulo de fase igual a zero é dita a frequência natural de ressonância do equipamento.

A Figura 6 e a Figura 7 mostram o Diagrama de Bode, a qual apresenta, a partir do método da varredura da resposta em frequência, o comportamento do módulo da impedância (apresentada no gráfico superior) e do ângulo da função de transferência (apresentada no gráfico inferior).

Outro fator importante é que, ao variar a frequência, ocorre um erro de relação. Este fato pode implicar em erros de leitura da proteção, o que pode provocar atuações indevidas, seja durante uma falha ou até mesmo quando há acionamentos indevidos da proteção como um todo.

Deste modo, instalações com grandes níveis de harmônicos podem fazer com que o equipamento opere de maneira indevida, provocando prejuízos consideráveis ao sistema.

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram, respectivamente, a variação do erro de relação em função da frequência, bem como os valores de tensão secundária e da impedância no secundário dos TPIS.

Figura 6 – Diagrama de Bode da Resposta em Frequência do projeto antigo.

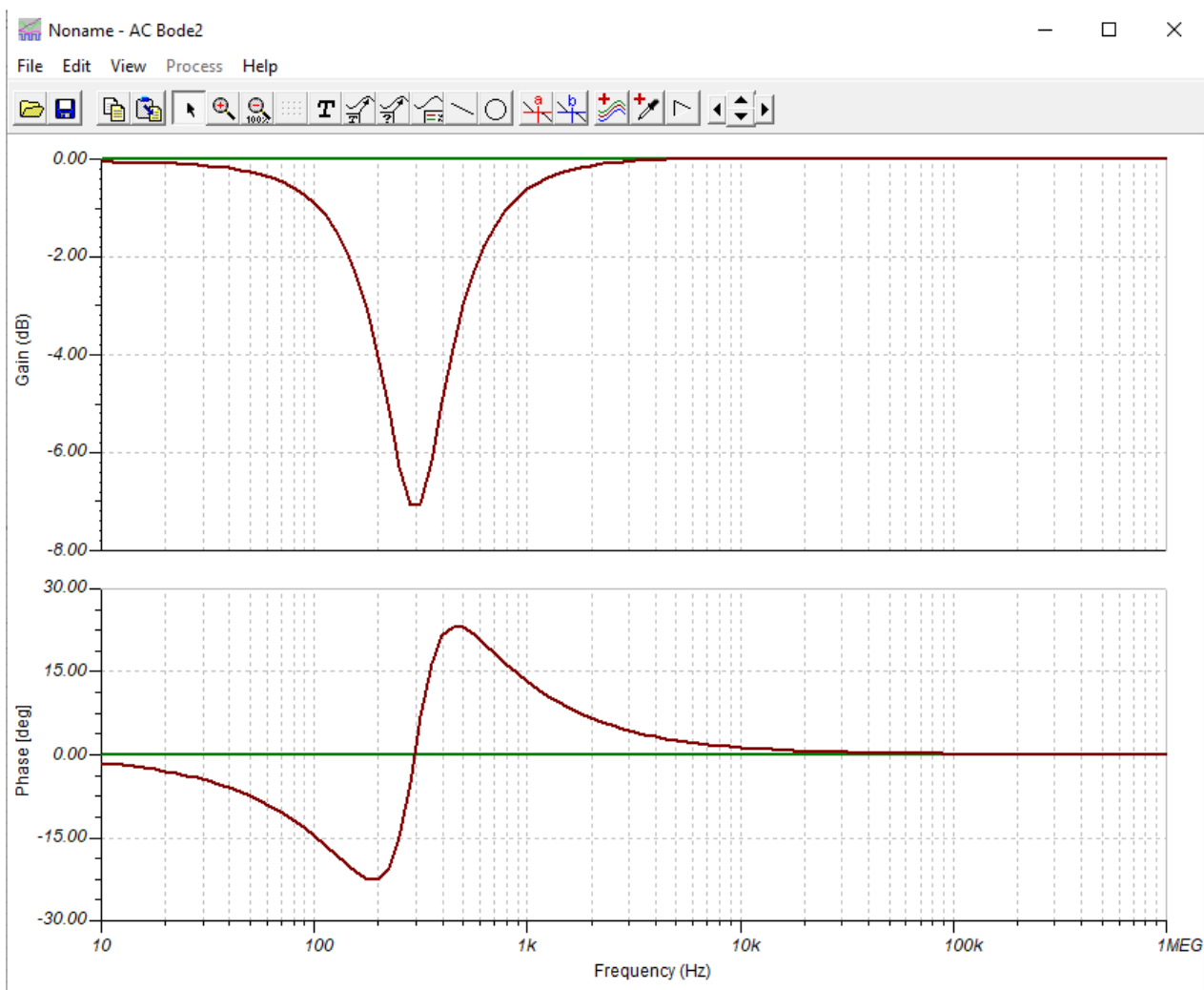


Figura 7 – Diagrama de Bode da Resposta em Frequência do projeto novo.

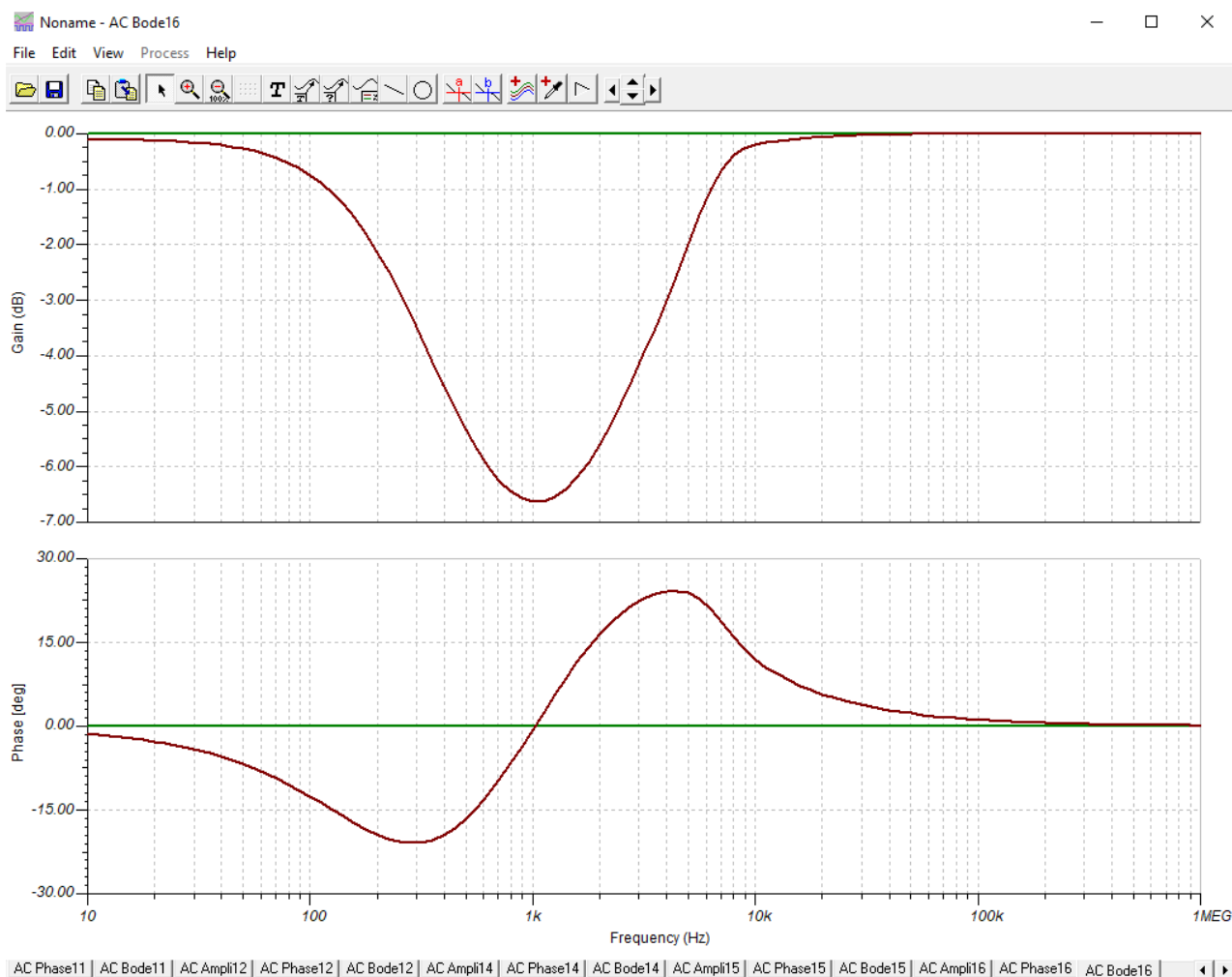


Tabela 2 – Relação da frequência com a tensão secundária, com a impedância do secundário e com o erro de relação do projeto antigo.

Frequência [Hz]	Tensão Secundária [V]	Impedância do Secundário [ohms]	Relação de Transformação	Erro de relação [%]
60,01	114,67	0,27	175,49	0,28
112,20	131,19	3,21	153,40	4,28
177,83	164,81	21,66	122,11	12,34
281,84	259,94	63,01	77,42	30,22
398,11	204,44	38,89	77,86	55,76
630,96	140,78	11,21	98,44	55,51
794,33	129,64	6,36	142,96	43,75
1000	120,07	2,20	166,38	6,92
1778,28	117,30	1,01	170,30	1,96
2511,89	115,99	0,49	172,22	0,86

Tabela 3 – Relação da frequência com a tensão secundária, com a impedância do secundário e com o erro de relação do projeto novo.

Frequência [Hz]	Tensão Secundária [V]	Impedância do Secundário [ohms]	Relação de Transformação	Erro de relação [%]
60,05	114,71	0,42	175,44	0,25
112,20	129,14	6,15	155,84	10,95
177,83	145,04	13,06	138,76	20,71
281,84	172,76	25,11	22,49	33,43
398,11	199,08	36,56	101,09	42,23
630,96	226,40	48,43	88,89	49,20
891,25	225,75	48,15	89,15	49,06
1000	219,84	45,58	91,54	47,69
1778,28	156,71	18,14	128,42	26,62
2511,89	131,94	7,37	152,52	12,84

3. Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um problema que tem sido cada vez mais comum em transformadores de potencial indutivo devido a distorções harmônicas na rede. Assim, inicialmente, foi apresentada a base teórica para que se pudesse dar suporte para o estudo que foi realizado utilizando simulação computacional a partir de medições em laboratório. De início, foi apresentado a questão da geometria das bobinas do enrolamento primário as quais apresentam capacitâncias parasitas determinantes para o estudo que permitiu encontrar a frequência natural de ressonância do equipamento para que fosse possível diminuir as chances de ocorrer o fenômeno de ferorressonância.

Pela observação da Tabela 2 e da Tabela 3, é possível observar que as mudanças na geometria da bobina do enrolamento primário, saindo de uma bobina para duas bobinas no enrolamento primário, mostrou que a frequência natural de ressonância saiu de, aproximadamente, 300 Hz para um valor próximo a 1000 Hz, o que mostra que, pela própria definição, a possibilidade do fenômeno de ferorressonância diminuiu consideravelmente, uma vez que, para o surgimento deste tipo de fenômeno, é necessário o surgimento de um transitório na rede. Desta forma, a geometria da bobina torna o equipamento mais confiável e mantendo o mesmo tamanho físico, o que garante melhor confiabilidade do equipamento do ponto de vista de estabilidade frente a transitórios, além de garantir valores de exatidão o mais próximo das normas vigentes. Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam feitos estudos envolvendo equipamentos que possam ter compatibilidade eletrônica com as cargas não-lineares que vêm sendo cada vez mais presentes no sistema como um todo, o que pode garantir ainda mais a precisão da operação da medição e do melhor desempenho dos sistemas de proteção como um todo.

4. Referências bibliográficas

[1] M. F. M. S. S. e. H. W. B. R. C. Dugan, Electrical Power Systems, Third Edition, McGraw-Hill, 2012.

- [2] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Application, and Design, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [3] A. N. d. E. E. -. ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*, Rio de Janeiro, 2021.
- [4] A. E. Fitzgerald, C. K. JR e A. Kusko, Máquinas Elétricas, McGraw-Hill Brasil, 1975.
- [5] T. M. Apostol, Cálculo Com Funções de Várias Variáveis e Álgebra Linear, com Aplicações às Equações Diferenciais e às Probabilidades, Volume 2, Revertê, 2002.
- [6] L. G. P. Nunes, *Estudo de Fenômenos de Ferorressonância em Transformadores de Potencial Aplicados à Subestações de Parques Eólicos*, Itajubá, 2023.
- [7] N. M., Curso de Física Básica, Volume 3, Blucher, 2013.
- [8] O. N. d. Sistema, *Submódulo 23.3: Diretrizes Para a Representação dos Elementos de Rede no Cálculo de Transitórios*, 2018.
- [9] CIGRÉ, *Guidelines For representation of Network Elements When Calculating Transients*, Paris, 2000.