

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

**Desenvolvimento de um Sistema de Teste de Ferrorressonância para
Transformadores de Potencial: Investigação Experimental em
Laboratório e Modelagem EMTP**

Brenno Torres Alcantara Rodrigues

Itajubá, julho de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brenno Torres Alcantara Rodrigues

Desenvolvimento de um Sistema de Teste de Ferrorressonância para Transformadores de Potencial: Investigação Experimental em Laboratório e Modelagem EMTP

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Arantes Nogueira

Itajubá, julho de 2024

Dedicatória

Dedico esta dissertação à minha mãe, Marcia Raimunda Torres Rodrigues, meu pai, Marcos Antonio Alcantara Rodrigues, e minha avó, Maria Benedita Torres, pelos anos de amor, carinho e cuidado que dedicaram a mim. Cada sacrifício que fizeram, cada sorriso que compartilharam e cada abraço que me deram moldaram quem sou hoje e me deram forças para perseguir meus sonhos. Esta dissertação é uma homenagem ao amor inabalável e à dedicação incansável deles em minha vida. Sem o amor e o apoio deles, nada do que alcancei seria possível. Que este trabalho seja também uma expressão do profundo agradecimento que sinto por tudo que fizeram por mim.

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Estácio Tavares Wanderlay Neto pela oportunidade de iniciar minha trajetória no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI) como estagiário, pela confiança em permitir a continuidade como colaborador e aluno de pós-graduação, e por todos os ensinamentos e orientações ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Expresso minha gratidão a Thiago Arantes Nogueira, amigo e coorientador desta dissertação, por seu incentivo e apoio desde o início desta jornada.

Agradeço a todos os demais professores e colaboradores do LAT-EFEI, em especial a Cleython Silvestre de Aguiar, pelo auxílio prestado e pelos momentos de amizade compartilhados.

À CAPES, pelo suporte financeiro concedido, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Brasformer Braspel pelo apoio técnico fornecido, o qual foi de grande importância para o desenvolvimento desta pesquisa.

Resumo

Oscilações ferrorressonantes envolvendo transformadores de potencial (TPs), têm se tornado um fenômeno crescente, especialmente em fazendas eólicas. A busca pela análise prática da ferrorressonância motivou o desenvolvimento de um sistema de ensaio especializado, combinando simulações computacionais e testes em laboratório, no qual foram explorados diversos aspectos relacionados à ocorrência do fenômeno, destacando a sensibilidade do sistema a combinações específicas de capacitâncias. Durante os ensaios, foram observados os efeitos da variação da capacitância *shunt* equivalente e da capacitância série nos circuitos, identificando os valores críticos que levam à ocorrência de ferrorressonância em cada TP estudado. Os resultados obtidos demonstraram a capacidade do sistema de testes em gerar e detectar o fenômeno de ferrorressonância em condições simuladas em laboratório, refletindo as operações reais do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O modelo de simulação EMTP desenvolvido revelou-se eficaz na previsão qualitativa dos possíveis modos de ferrorressonância, desde que os parâmetros do sistema fossem conhecidos ou estimados.

Palavras-chave: ferrorressonância, transformadores de potencial, testes em laboratório, modelo EMTP, sistema elétrico de potência.

Abstract

Ferroresonance oscillations involving voltage transformers (VTs) have become a growing phenomenon, especially in wind parks. The search for practical analysis of ferroresonance has motivated the development of a specialized testing system, combining computational simulations and laboratory tests, which explored various aspects related to the occurrence of the phenomenon, highlighting the sensitivity of the system to specific combinations of capacitances. During the tests, the effects of varying the equivalent shunt capacitance and the series capacitance in the circuits were observed, identifying critical values that lead to the occurrence of ferroresonance in each VT studied. The obtained results demonstrated the ability of the testing system to generate and detect the ferroresonance phenomenon under laboratory-simulated conditions, reflecting the real operations of the Power System. The developed EMTP simulation model proved effective in qualitatively predicting possible modes of ferroresonance, provided that the system parameters were known or estimated.

Key words: ferroresonance, voltage transformers, laboratory tests, EMTP model, power system.

Lista de Figuras

Figura 1 - Circuito RLC com indutância linear e resposta transitória [22].	20
Figura 2 - Circuito RLC com indutância de saturação e resposta transitória [22].	21
Figura 3 - Circuito RLC com indutância não linear e acoplamento de tensão. Adaptado de [22].	22
Figura 4 - Circuito RLC série. Adaptado de [15].	23
Figura 5 - Solução gráfica de um circuito ferrorressonante série ($R = 0$). Adaptado de [15].	25
Figura 6 - Ferrorressonância de modo fundamental [22].	27
Figura 7 - Ferrorressonância de modo sub-harmônico (20 Hz) [22].	27
Figura 8 - Ferrorressonância de modo quase periódico [22].	28
Figura 9 - Ferrorressonância de modo caótico [22].	29
Figura 10 - Comutações desbalanceadas [22].	30
Figura 11 - TPs aplicados em sistemas não aterrados [22].	31
Figura 12 - Circuito ferrorressonante com capacitores de equalização do disjuntor. Adaptado de [22].	32
Figura 13 - Circuito equivalente do TPC com FSC. Adaptado de [22].	33
Figura 14 - TP em uma linha desenergizada próxima a uma linha energizada. Adaptado de [22].	34
Figura 15 - Oscilação de ferrorressonância decrescente com quinto sub-harmônico 50/5 Hz [12].	36
Figura 16 - Oscilação de ferrorressonância de regime estacionário na frequência de operação [12].	37
Figura 17 - Oscilação de ferrorressonância de regime estacionário com 10 Hz [12].	37
Figura 18 - Oscilação de ferrorressonância caótica de regime estacionário [12].	38
Figura 19 - Fluxograma do procedimento de ensaio.	39
Figura 20 - Amostras de TPs.	41
Figura 21 - Modelo de simulação completo para TPI.	43
Figura 22 - Modelo de simulação completo para TPC.	44
Figura 23 - Curva de saturação da amostra A01.	46
Figura 24 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A01.	46
Figura 25 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A01.	47
Figura 26 - Curva de saturação da amostra A02.	48
Figura 27 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A02.	48
Figura 28 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A02.	49
Figura 29 - Curva de saturação da amostra A03.	50
Figura 30 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A03.	50
Figura 31 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A03.	51
Figura 32 - Curva de saturação da amostra B04.	52
Figura 33 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra B04.	52
Figura 34 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra B04.	53
Figura 35 - Representação do circuito de ensaio de ferrorressonância.	54
Figura 36 - Gerador de funções e amplificador de sinais.	55
Figura 37 - Transformador monofásico.	55
Figura 38 - Disjuntor de média tensão.	56
Figura 39 - Módulos de capacitores.	57
Figura 40 - Elementos do sistema de medição.	58
Figura 41 - Curvas da variação da corrente RMS em função da tensão aplicada.	60
Figura 42 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 50 pF – 705 pF.	61
Figura 43 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 50 pF – 705 pF.	62
Figura 44 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.	62
Figura 45 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.	63
Figura 46 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 1410 pF – 1410 pF.	63
Figura 47 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 1410 pF -1410 pF.	64
Figura 48 - Simulação FR na amostra A02, cenário de 50 pF – 705 pF.	65
Figura 49 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 50 pF – 705 pF.	65
Figura 50 - Simulação FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.	66
Figura 51 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.	66
Figura 52 - Simulação da corrente na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.	67

Figura 53 - Oscilograma da corrente na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.....	67
Figura 54 - Simulação FR na amostra A03, cenário de 50 pF – 235 pF.	68
Figura 55 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 50 pF – 235 pF.....	69
Figura 56 - Simulação FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.	69
Figura 57 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.....	70
Figura 58 - Simulação FR na amostra B01, cenário de 50 pF – 2350 pF.	71
Figura 59 - Oscilograma de FR na amostra B01, cenário de 50 pF – 2350 pF.....	71
Figura 60 - Simulação FR na amostra A05, cenário de 50 pF – 705 pF.	72
Figura 61 - Oscilograma de FR na amostra A05, cenário de 50 pF – 705 pF.....	72
Figura 62 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.....	78
Figura 63 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 50 pF.....	78
Figura 64 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 1410 pF – 0 pF.....	79
Figura 65 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 2350 pF – 1410 pF.....	79
Figura 66 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 2350 pF – 2350 pF.....	80
Figura 67 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 705 pF – 0 pF.....	80
Figura 68 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.....	81
Figura 69 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 1410 pF.....	81
Figura 70 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.....	82
Figura 71 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 705 pF – 0 pF.....	82
Figura 72 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 705 pF – 50 pF.....	83
Figura 73 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 0 pF.....	83
Figura 74 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 50 pF.....	84
Figura 75 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 235 pF.....	84
Figura 76 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 0 pF.....	85
Figura 77 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 50 pF.....	85
Figura 78 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 235 pF.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características das amostras de TPs.....	40
Tabela 2 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A01	45
Tabela 3 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A02	47
Tabela 4 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A03	49
Tabela 5 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra B04.....	51
Tabela 6 - Resultados do ensaio de ferromagnetização na amostra A01	61
Tabela 7 - Resultados do ensaio de ferromagnetização na amostra A02	64
Tabela 8 - Resultados do ensaio de ferromagnetização na amostra A03	68
Tabela 9 - Resultados do ensaio de ferromagnetização na amostra B04	70

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AC	<i>Alternating current</i> – corrente alternada.
ATP	<i>Alternative Transients Program</i> .
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> – transformada discreta de Fourier.
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i> .
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – transformada rápida de Fourier.
FR	Ferorressonância
FSC	Circuito de supressão de ferorressonância
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i> - Varistor à oxido metálico.
NBR	Norma Técnica Brasileira.
p.u.	Por unidade.
RLC	Resistência, indutância e capacitância
RMS	<i>Root Mean Square</i> – valor eficaz.
SEP	Sistema elétrico de potência
TC	Trasformador de corrente
TP	Transformador de potencial
TPC	Transformador de potencial capacitivo
TPI	Transformador de potencial indutivo
TRT	Tensão de restabelecimento transitória

Lista de Símbolos

●	Ocorrência de ferrorressonância sustentada
▲	Ocorrência de ferrorressonância não sustentada
x	Ausência de ferrorressonância
α	Constante de tempo.
λ	Fluxo concatenado.
π	Constante pi.
ϕ	Fluxo magnético.
μF	Microfarad.
ω	Frequência angular.
A	Amper.
C	Capacitância.
cos	Cosseno.
C_B	Capacitor <i>shunt</i> equivalente.
C_S	Capacitor de equalização.
d/dt	Derivada primeira no tempo.
d^2/dt^2	Derivada segunda no tempo.
f	Frequência
f_0	Frequência natural para indutor linear não saturavel.
f_1	Frequência natural para indutor saturavel na região linear.
f_2	Frequência natural para indutor saturavel na região saturada.
f_s	Frequência da fonte.
i	Corrente elétrica.
$i(0)$	Corrente elétrica no instante zero.
I_M	Corrente ferrorressonante.
L	Indutância.
L_1	Indutância na região linear.
L_2	Indutância na região saturada.
mA	miliamper.
n°	número ordinal.
N	Número de enrolamentos.
pF	Picofarad.

R	Resistência elétrica.
s	Segundo.
t	Tempo.
T	Período.
U	Tensão elétrica.
U_p	Tensão primária.
U_s	Tensão na fonte.
U_s	Tensão secundária.
V	Volt.
V_C	Tensão no capacitor.
$V_C(0)$	Tensão no capacitor no instante zero.
V_{Eq}	Tensão equivalente.
V_S	Tensão de condução.
V_L	Tensão no indutor.
V_M	Tensão ferromressonante.
V_R	Tensão no resistor.
X_C	Reatância capacitiva.
X_L	Reatância indutiva.
X_{Lsat}	Reatância indutiva saturada.
X_M	Reatância de magnetização.
Z_S	Impedância série.

Sumário

Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
Lista de Símbolos.....	xi
1 Introdução	15
1.1 Contextualização e Motivação.....	15
1.2 Objetivos propostos	16
1.3 Estrutura do trabalho	17
2 Fundamentação Teórica	18
2.1 Ferrorressonância: uma descrição do fenômeno	18
2.2 O circuito ferorressonante	20
2.3 Solução do circuito ferorressonante	22
2.4 Tipos de ferorressonância.....	26
2.4.1 Modo fundamental.....	26
2.4.2 Modo sub-harmônico.....	27
2.4.3 Modo quase periódico	28
2.4.4 Modo caótico	28
2.5 Categorias de circuitos ferorressonantes	29
2.5.1 Comutação desbalanceada.....	29
2.5.2 Transformador de potencial conectado a um sistema com neutro isolado	30
2.5.3 Transformador energizado através da capacitancia de equalização de um ou mais disjuntores.....	31
2.5.4 Transformador de potencial capacitivo	32
2.5.5 Transformador conectado a uma linha isolada em paralelo com uma ou mais linhas energizadas	34
2.6 Fundamentos de simulação de ferorressonância	35
3 Procedimento Experimental e Simulação Computacional	39
3.1 Características dos transformadores de potencial (TPs) utilizados neste trabalho	40
3.2 Levantamento da curva de magnetização	41
3.3 Ensaio de Impedância de Curto	41

3.4	Medição da corrente de excitação	42
3.5	Desenvolvimento do Modelo de Simulação	42
3.5.1	Dados do elemento não linear e dos resistores série e de magnetização	44
3.5.1.1	Amostra A01	45
3.5.1.2	Amostra A02	47
3.5.1.3	Amostra A03	49
3.5.1.4	Amostra B04.....	51
3.6	Desenvolvimento do sistema experimental de ferorressonância.....	53
3.6.1	Sistema de alimentação	54
3.6.2	Sistema de comutação	56
3.6.3	Circuito ferorressonante	56
3.6.4	Sistema de medição	57
4	Resultados e Discussão	59
4.1	Validação do modelo	59
4.2	Resultados de ferorressonância	60
4.3	Análise dos resultados	72
5	Considerações finais	74
5.1	Conclusões.....	74
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	74
	Referências.....	76
	ANEXO A – Oscilogramas de ferorressonância.....	78

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

Os sistemas elétricos de potência (SEP), constituídos por diversos equipamentos ao longo de centenas e até milhares de quilômetros, estão continuamente expostos a diversos tipos de distúrbios que podem resultar em transitórios eletromagnéticos na rede. Tais distúrbios podem ter origem externa, como as descargas atmosféricas, ou internas como os surtos de manobra causados por acionamento de chaves e disjuntores [1].

A ressonância e a ferrorressonância são exemplos desses distúrbios que podem ocorrer no SEP, causando problemas econômicos, de qualidade e de segurança. Embora ambos os fenômenos sejam considerados distúrbios de baixa frequência, o fenômeno de ferrorressonância não deve ser confundido com o da ressonância linear que ocorre quando as reatâncias indutivas e capacitivas em um sistema são de iguais magnitudes em determinada frequência [2].

A ferrorressonância é um fenômeno eletromagnético que ocorre sob condições específicas em que a indutância não linear de transformadores de potência ou transformadores de potencial é acoplada ao sistema por meio de capacitâncias. Dessa forma, é um fenômeno frequente no SEP devido à indutância saturável dos transformadores e ao efeito capacitivo das linhas de transmissão e distribuição. O resultado dessas interações consiste em possíveis sobretensões, sobrecorrentes e formas de onda distorcidas por longos períodos de tempo, causando risco à integridade dos equipamentos do SEP [3, 4].

Frequentemente o fenômeno de ferrorressonância é iniciado após alguma perturbação transitória ou operação de comutação, como rejeição de carga, eliminação de faltas, energização de transformador, comutação monofásica ou perda de aterramento do sistema. Contudo, a ocorrência da ferrorressonância está sujeita a uma série de outros fatores, tais como as condições iniciais do sistema, a característica de saturação do núcleo de ferro do transformador, os fluxos residuais no núcleo do transformador, o tipo de conexão do enrolamento do transformador, a capacitância do circuito, o momento de comutação e as perdas totais do sistema [4, 5].

De maneira geral é possível que ocorram sobretensões transitórias após eventos de comutação, levando o sistema elétrico de potência a uma situação de ferrorressonância. Devido à natureza não linear desse fenômeno, é possível identificar quatro tipos de respostas em estado estacionário: modo fundamental, modo sub harmônico, modo quase periódico e modo caótico. Todos os quatro modos são plausíveis de ocorrer nos casos em que há interações entre

parâmetros do sistema elétrico e o núcleo magnético de um Transformador de Potencial Indutivo (TPI) [6].

No momento atual observa-se um aumento na ocorrência do fenômeno de ferrorressonância, especialmente em fazendas eólicas. Essas fazendas possuem vários TPIs e circuitos subterrâneos, que apresentam altas capacitâncias equivalentes. Esse ambiente propício favorece a manifestação desse fenômeno, o qual, como consequência, pode causar danos aos equipamentos e resultar em perdas financeiras para os produtores, concessionárias de energia e consumidores [6].

Existem numerosos estudos sobre ferrorressonância em transformadores de potência que foram conduzidos e publicados. No entanto, o fenômeno ainda é pouco explorado quando se trata de transformadores de potencial, especialmente no que diz respeito aos testes e ensaios de ferrorressonância em laboratório. Há uma lacuna significativa no conhecimento científico sobre essa área específica, o que indica a necessidade de pesquisas mais aprofundadas nesse campo.

É importante destacar que os TPs desempenham um papel crucial na medição de tensões em sistemas de energia elétrica. Portanto, compreender os efeitos da ferrorressonância nesses dispositivos é fundamental para garantir a confiabilidade e a exatidão das medições elétricas.

Investigações adicionais nessa área e o desenvolvimento de modelos e simulações podem fornecer informações valiosas sobre os mecanismos subjacentes da ferrorressonância em TPs, bem como sobre as melhores práticas para evitar ou mitigar seus efeitos indesejados.

1.2 Objetivos propostos

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um sistema de ensaio de ferrorressonância que seja capaz de reproduzir, em ambiente de laboratório, as condições de operação real do SEP. Esse sistema deve proporcionar as condições necessárias para a ocorrência e análise do fenômeno e ser utilizado para validar modelos utilizados em softwares de simulação de transitórios.

Os objetivos complementares incluem:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre os principais conceitos envolvendo o fenômeno de ferrorressonância;
- Construção de modelos e realização de simulações de ferrorressonância utilizando

o software ATP (*Alternative Transient Program*). Esses modelos permitem a comparação de resultados obtidos em simulação e ensaios de laboratório;

- Realização de ensaios de ferrorressonância em transformadores de potencial com diferentes tecnologias de construção;
- Validação dos modelos de simulação de ferrorressonância através de comparação com os resultados obtidos nos ensaios práticos.

Com a consecução desses objetivos, espera-se obter um amplo conjunto de dados experimentais e modelos de simulação confiáveis que permitam avançar na compreensão da ferrorressonância em TPs. Esses resultados serão fundamentais para melhorar o projeto, a fabricação e a operação desses dispositivos, visando mitigar os efeitos negativos da ferrorressonância e aumentar a eficiência e confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Apresenta uma introdução ao trabalho, descreve a proposta e os objetivos a serem alcançados.
- Capítulo 2 – Desenvolvimento da fundamentação teórica do tema proposto, mostrando os conceitos básicos de ferrorressonância, os principais circuitos, tipos e categorias que envolvem o fenômeno.
- Capítulo 3 – São apresentados o desenvolvimento da modelagem e do sistema experimental para geração e análise do fenômeno de ferrorressonância.
- Capítulo 4 – São apresentados e comparados os resultados obtidos em simulação e nos testes em laboratório.
- Capítulo 5 – São apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O objetivo deste capítulo é estabelecer uma base teórica para o desenvolvimento deste trabalho. Inicia-se com uma explicação abrangente do fenômeno de ferrorressonância, abordando tanto sua definição quanto suas principais características.

Posteriormente, após uma introdução ao conceito de ferrorressonância, é apresentado o circuito ferrorressonante genérico, acompanhado dos conceitos de solução analítica e solução gráfica.

Por fim, são explorados os diferentes modos de ferrorressonância que podem surgir no sistema, assim como as diversas categorias de circuitos ferrorressonantes.

2.1 Ferrorressonância: uma descrição do fenômeno

A palavra ferrorressonância foi usada pela primeira vez na década de 1920 para descrever um fenômeno de ressonância complexa em um circuito RLC com indutância não linear [7]. Entretanto, o primeiro trabalho publicado relativo a ferrorressonância data de 1907, onde o fenômeno foi descrito como “ressonância de transformador” [8, 9].

Atualmente, a ferrorressonância é um fenômeno amplamente estudado e seus aspectos teóricos são descritos em diversas publicações. Entretanto, apesar da extensa literatura disponível, alguns autores ainda consideram esse fenômeno em grande parte desconhecido e, frequentemente, difícil de lidar [10, 11]. A possível razão é à sua dependência de diversos fatores, o que pode dar a impressão de que o fenômeno ocorre de forma aleatória ou imprevisível.

Uma publicação importante foi realizada em 2014 pela IEC através do grupo de trabalho *Technical Committee Instruments Transformers* encarregado de preparar um relatório técnico publicado como IEC 61869-102 (*Instrument transformers Part 102: Ferroresonance oscillations in substations with inductive voltage transformers*) e adotada de forma idêntica, em conteúdo, estrutura e redação pela Associação Brasileira de Normas Técnicas e publicada em 2022 como ABNT IEC/TR 61869-102 (Transformadores para instrumento Parte 102: Oscilações de ferrorressonância em subestações com transformadores de potencial indutivos) [12].

A ferrorressonância é descrita na literatura como um fenômeno oscilatório que aparece em cenários envolvendo indutâncias não lineares associadas com elementos capacitivos e condições de baixas perdas, resultando em sobretensões e sobrecorrentes altamente distorcidas

[13 – 17], o que torna o fenômeno um problema para as concessionárias e fabricantes de equipamentos.

A presença da indutância não linear nos sistemas é frequentemente associada à existência de materiais ferromagnéticos com núcleo saturável, como é o caso dos transformadores de potência, transformadores de corrente (TCs) e TPs. De forma específica, os TPs se destacam, pois possuem uma construção que geralmente apresenta uma potência nominal consideravelmente reduzida, uma vez que sua função primária é metrológica, e não energética. Essa particularidade dos TPs os tornam particularmente sensíveis ao fenômeno de ferrorressonância [18], um problema que pode comprometer sua operação e, conseqüentemente, a confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

As capacitâncias estão presentes de diversas formas no SEP. Um sistema de energia típico pode conter capacitores em série para a compensação de linha, bancos de capacitores *shunt*, cabos subterrâneos, acoplamento capacitivo, linhas de circuito duplo, sistemas aterrados por capacitância parasita, capacitores de equalização em disjuntores, capacitores de surto de gerador ou até mesmo acoplamento capacitivo interno aos transformadores [19]. Como resultado, são inúmeras as possibilidades de criar um caminho de circuito ferrorressonante.

A ferrorressonância não deve ser confundida com o fenômeno de ressonância linear, que ocorre quando as reatâncias indutivas e capacitivas de um circuito são iguais. Como enfatizado por EMIN et al. [20], na ressonância linear, a relação entre corrente e tensão é linear e dependente da frequência. Por outro lado, a ferrorressonância é caracterizada por um salto repentino de tensão ou corrente de um estado operacional estável para outro e a relação entre tensão e corrente depende não apenas da frequência, mas também de uma série de outros fatores, como a magnitude da tensão do sistema, as perdas totais e o instante de comutação no circuito ferrorressonante.

Os transitórios eletromagnéticos, geralmente de baixas frequências (abaixo de 5 kHz), como aqueles originados durante a energização e desenergização de sistemas elétricos, situações de curto-circuitos e rejeição de carga, constituem o ponto de partida para ocorrência do fenômeno de ferrorressonância. No entanto, a manifestação da ferrorressonância frente a esses transitórios depende de condições específicas, tais como a magnitude da tensão do sistema, as condições do fluxo magnético no núcleo do material ferromagnético, as perdas no circuito e até mesmo o instante de fechamento ou ângulo de comutação do sistema [21].

2.2 O circuito ferrossonante

Inicialmente, considera-se um circuito RLC simples, conforme ilustrado na Figura 1, onde a indutância (L) é linear e não apresenta saturação. Nesse caso, a tensão e a corrente estão relacionadas linearmente de maneira dependente da frequência. Quando a chave é aberta enquanto há carga no capacitor, ocorre uma oscilação na tensão V_C na frequência natural f_0 , como expresso na equação 1. Essa oscilação é resultado da troca de energia entre o capacitor e o indutor. Se a resistência for nula, as oscilações continuarão indefinidamente, sem decaimento de amplitude.

No entanto, no circuito em questão, a resistência é muito pequena, resultando em um circuito subamortecido. Isso significa que as oscilações continuarão, mas serão gradualmente amortecidas, e a tensão V_C eventualmente se aproximará de zero ao longo do tempo.

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (1)$$

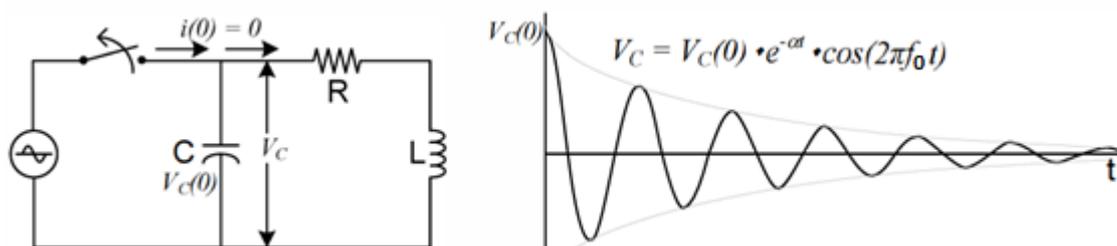


Figura 1 - Circuito RLC com indutância linear e resposta transitória [22].

No circuito RLC simples, conforme destacado por SANTOSO et al. [11], caso a reatância capacitiva X_C se iguale a reatância indutiva X_L , a corrente resultante pode atingir níveis elevados, limitada apenas pela resistência R , o que pode levar a consideráveis sobretensões. No entanto, a possibilidade de X_C corresponder exatamente a X_L é pequena, pois ambos os valores são tipicamente constantes e lineares. Entretanto, em situações em que o valor de X_L varia, como em um transformador com núcleo de ferro, a possibilidade de X_C coincidir com X_L aumenta consideravelmente.

Considere então a Figura 2, que é o mesmo circuito, mas com indutância não linear. Neste caso, existem duas frequências naturais principais a serem consideradas, f_1 para a indutância magnetizante na região não saturada e f_2 para a indutância na região de saturação.

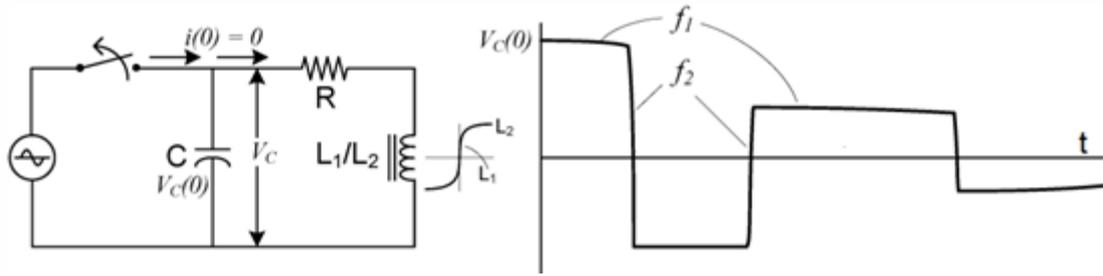


Figura 2 - Circuito RLC com indutância de saturação e resposta transitória [22].

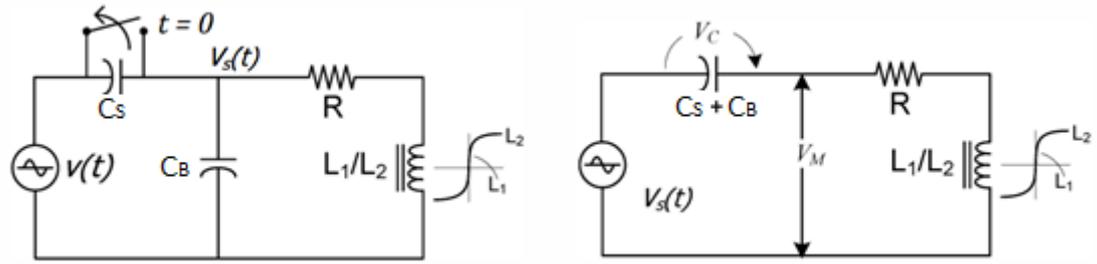
$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C}} \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C}} \quad (3)$$

Ao adicionar um capacitor C_S ao circuito da Figura 2, com o objetivo de demonstrar o efeito de um acoplamento de tensão, ocorre a formação de um típico circuito ferorrressonante, como mostra a figura 3(a), onde C_B representa uma capacitância *shunt*. Esse circuito apresenta uma capacitância total ($C_S + C_B$) que interage com a indutância não linear, podendo resultar em um fenômeno de ferorrressonância [22]. O circuito equivalente é representado na Figura 3(b), e a tensão equivalente $V_s(t)$ é destacada na Figura 3(c).

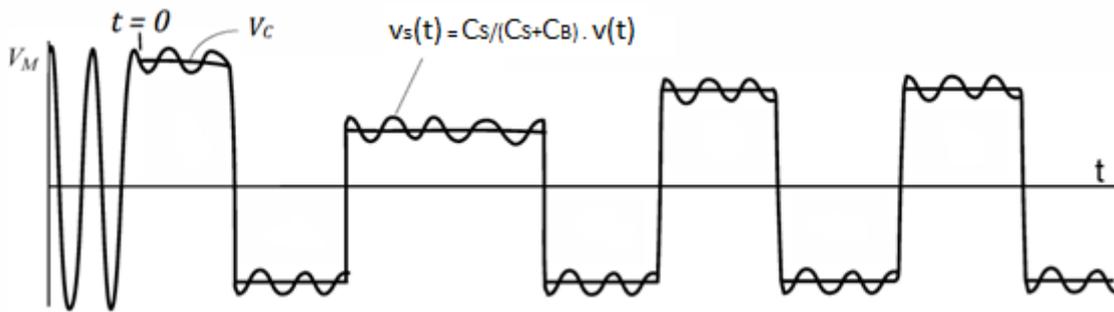
Quando uma fonte de tensão externa é capaz de compensar as perdas devido à resistência R , juntamente com as condições iniciais do capacitor e o fluxo remanescente no início do transitório, pode-se estabelecer uma condição sustentada. Dessa forma, quanto menor a resistência, menor a tensão necessária para sustentar a ferorrressonância [7].

Nesse estado operacional específico, as oscilações sustentadas no sistema, apresentam altas amplitudes e frequências características. A ocorrência desse fenômeno está sujeita a uma combinação de fatores, incluindo a magnitude adequada da tensão equivalente e as condições iniciais do sistema. Essas condições específicas são essenciais para estabelecer e sustentar a ferorrressonância no circuito [9].



(a) Circuito RLC com acoplamento de tensão

(b) Equivalente da figura (a)



(c) Estado operacional ferrorressonante

Figura 3 - Circuito RLC com indutância não linear e acoplamento de tensão. Adaptado de [22].

Além das sobretensões e sobrecorrentes já mencionadas, o fenômeno da ferrorressonância é marcado pela expressiva presença do terceiro modo sub-harmônico (20 Hz) [13, 23]. Para analisar tais componentes com sinais discretos, é amplamente empregada a Transformada Discreta de Fourier (DFT). As raízes físicas subjacentes à ocorrência desses sub-harmônicos e a aplicação da DFT são minuciosamente esclarecidas em [7].

2.3 Solução do circuito ferrorressonante

Na análise do fenômeno de ferrorressonância podem ser empregados três métodos distintos: testes de laboratório e de campo, a utilização de ferramentas de simulação digital e a aplicação de modelos matemáticos e técnicas analíticas [8].

A análise baseada em técnicas analíticas demanda a resolução de equações diferenciais, que determinam o comportamento dos parâmetros do circuito em função do tempo. No entanto, dada a natureza não linear do sistema, a análise convencional de circuitos lineares não se aplica, tornando a abordagem analítica extremamente complexa [7].

Conforme destacado por EMIN et al. [24], métodos dinâmicos não lineares fornecem

uma linguagem matemática mais apropriada para o estudo da ferorrressonância. Além disso, o autor apresenta um breve histórico de algumas ferramentas matemáticas que têm sido empregadas ao longo do tempo na análise desse fenômeno.

Tomando como exemplo o circuito RLC simples, no qual uma indutância não linear está presente, como ilustrado na Figura 4. Para obter a resposta analítica desse circuito, é necessário resolver a equação diferencial não linear (4). A não linearidade intrínseca da equação surge devido ao fato de que a indutância do circuito não é dependente apenas da frequência.

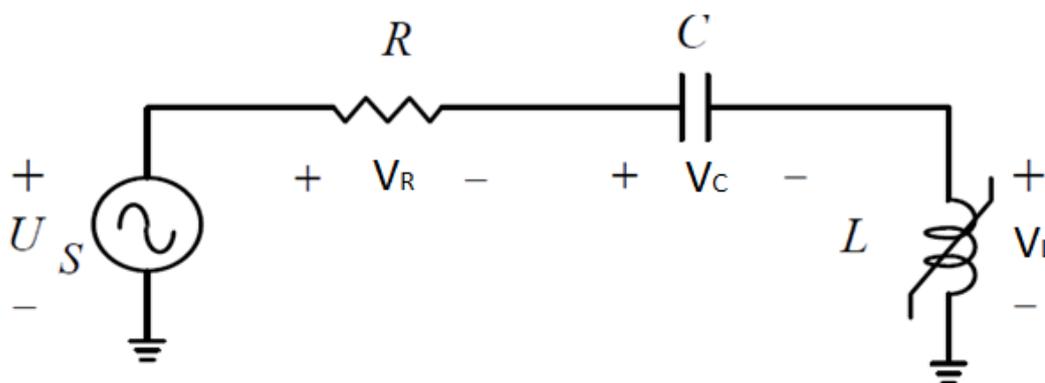


Figura 4 - Circuito RLC série. Adaptado de [15].

$$L \cdot \frac{d^2i}{dt^2} + R \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i = \omega \cdot U_s \cdot \cos(\omega t) \quad (4)$$

Essa característica não linear intrínseca pode ser expressa como uma forma polinomial genérica de ordem n [25], conforme equação (5), e o fluxo concatenado no elemento não linear é expresso pela equação (6).

$$\phi(t) + \phi^n(t) = L \cdot i(t) \quad (5)$$

$$\lambda(t) = N \cdot \phi(t) \quad (6)$$

Onde, ϕ é o fluxo magnético do elemento não linear, L é a indutância do elemento não linear, i é a corrente do circuito, N é o número de enrolamentos no elemento não linear e λ é o fluxo concatenado.

As equações (5) e (6) levam à seguinte equação (7):

$$i(t) = \frac{1}{N \cdot L} \cdot \lambda(t) + \frac{1}{N^n \cdot L} \cdot \lambda^n(t) \quad (7)$$

Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff e as derivadas, como apresentado em [25], a equação (8) expressa o comportamento do circuito ferorrressonante, onde a característica não linear da equação diferencial é representada pelo termo final.

$$U_{max} \cos(\omega t) = L \cdot \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i(t) + \frac{d\lambda(t)}{dt} \cdot \left(\frac{L}{N} + \frac{n \cdot L \cdot \lambda(t)}{N^n} \right) \quad (8)$$

O relatório técnico ABNT IEC/TR 61869-102 [12], proporciona uma análise mais aprofundada de um circuito RLC, empregando equações diferenciais, como demonstrado em seu Anexo A.3. Neste documento é apresentada uma modelagem matemática utilizando o fluxo magnético como variável dependente, culminando na dedução da equação adaptada (9) denominada Equação-Duffing. Através dessa abordagem, a análise ganha um nível de detalhamento maior, permitindo uma compreensão mais minuciosa dos aspectos envolvidos no comportamento do circuito.

$$\frac{d^2 \lambda}{dt^2} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \frac{d\lambda}{dt} + \frac{A_1}{C} \cdot \lambda + \frac{A_3}{C} \cdot \lambda^3 + \frac{A_5}{C} \cdot \lambda^5 = \frac{1}{C} \cdot \omega \cdot U_s \cdot \cos(\omega t) \quad (9)$$

A solução gráfica, conhecida como Método de Rudenberg, para o mesmo circuito ferorrressonante RLC, mas sem perdas ($R = 0$), é apresentada por KARAAGAC et al. [15], conforme ilustrado na Figura 5. A interseção da linha " $U_s + V_C$ " com a curva não linear $V_L(I)$ resulta três pontos de operação possíveis:

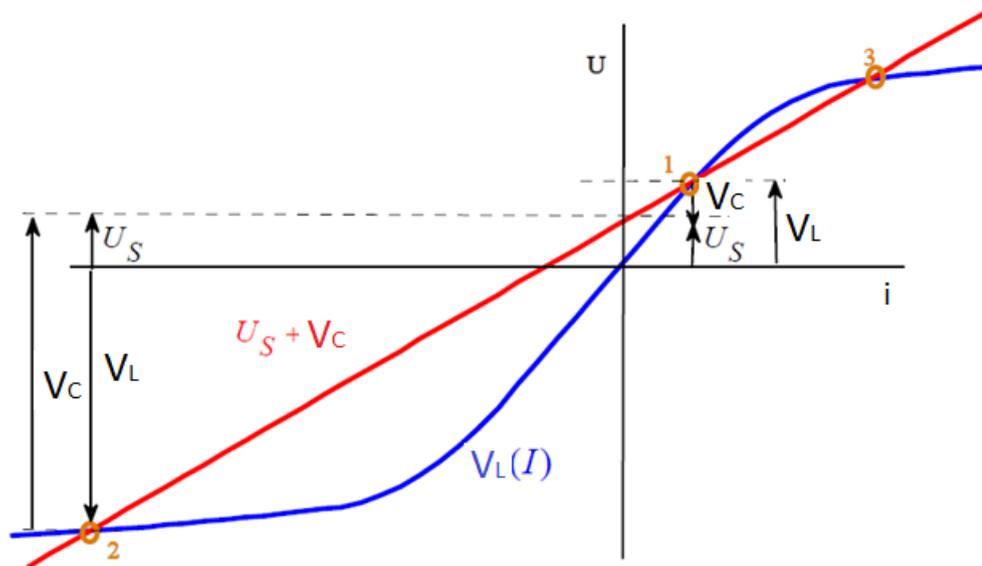


Figura 5 - Solução gráfica de um circuito ferrorressonante série ($R = 0$). Adaptado de [15].

Ponto de operação 1: este ponto representa um estado de equilíbrio estável e não ferrorressonante, caracterizado pela operação normal na região linear das características de magnetização do indutor saturável. Nesse ponto, a corrente e o fluxo de excitação estão dentro dos limites de projeto, e o sistema opera de acordo com as especificações planejadas. A tensão no indutor (V_L) é superior à tensão na capacitância (V_C), estabelecendo um equilíbrio que mantém uma tensão em estado estacionário nos terminais do indutor. Esse ponto é crucial para a operação segura e eficaz do sistema, pois reflete um cenário de funcionamento dentro dos parâmetros previstos, evitando oscilações não desejadas e perigosas [26].

Ponto de operação 2: este ponto representa um estado estável, porém ferrorressonante, caracterizado por operar na zona de saturação, onde a tensão no indutor (V_L) é menor do que a tensão no capacitor (V_C). Nessa situação, ocorre uma condição capacitiva (na qual a reatância indutiva em saturação, X_{Lsat} , é menor que a reatância capacitiva, X_C), resultando em densidades de fluxo e corrente de excitação que ultrapassam os limites de projeto original [26].

Ponto de operação 3: este ponto representa um estado operacional instável, caracterizado por um comportamento não convencional do sistema. Nele, observa-se uma relação anômala entre a tensão da fonte e a corrente, que viola a teoria convencional do equilíbrio entre esses parâmetros [26]. Portanto, a solução não permanecerá lá no estado estacionário, entretanto, pode passar por este ponto durante um transitório [11].

2.4 Tipos de ferorrressonância

A operação do sistema no estado de ferorrressonância é um fenômeno de rede e, como afirmado, dependente de diversos fatores [18]. Esses fatores incluem a magnitude da tensão do sistema, a tensão inicial no capacitor, o estado inicial das características magnéticas do transformador, a perda total no circuito e o ponto específico de comutação no sistema [9].

Normalmente, a ocorrência da ferorrressonância é desencadeada após algum tipo de evento de comutação, como a energização do transformador, comutações monofásicas, eliminação de faltas, queima de fusíveis, abertura de disjuntores ou perda do aterramento do sistema [17, 19].

Quando as condições apropriadas são satisfeitas, a resposta pode transitar abruptamente de um ponto de operação normal (senoidal, na mesma frequência da fonte) para um dos seguintes modos ferorrressonantes: modo fundamental, modo sub-harmônico, modo quase periódico ou modo caótico. Estes modos são caracterizados por sobretensões consideráveis e níveis harmônicos elevados, que podem resultar em sobreaquecimento e falha no isolamento de transformadores, além de causar interrupções substanciais na operação do sistema [15].

Diversos métodos gráficos vem sendo empregados, como ferramentas analíticas, para visualizar e analisar os modos de ferorrressonância. Entre as representações gráficas utilizadas, incluem-se o mapa de Poincaré, o diagrama de bifurcação e as trajetórias no plano de fase. Essas ferramentas gráficas ajudam na compreensão e na investigação dos comportamentos associados à ferorrressonância e estão brevemente descritos em [27].

2.4.1 Modo fundamental

O modo de ferorrressonância mais comum e mais simples de analisar é o modo fundamental, conforme ilustrado na Figura 6, onde V_s representa a tensão do sistema, V_C representa a tensão na capacitância de acoplamento, V_M representa a tensão resultante na indutância não linear e I_M a corrente ferorrressonante. Nesse modo, a forma de onda da tensão ferorrressonante (V_M) oscila na mesma frequência da tensão de condução (V_s), que é um de seus componentes. O espectro do sinal é um espectro descontínuo consistindo na frequência fundamental do sistema de potência e seguido por seus harmônicos (2° , 3° ... n°) [9, 26].

Um aspecto a se destacar é que a tensão ferorrressonante de pico pode ser significativamente maior do que a tensão do sistema, resultando em problemas de sobretensão. Além disso, a ferorrressonância produz picos de corrente intensos, que podem causar danos térmicos se a condição persistir [22].

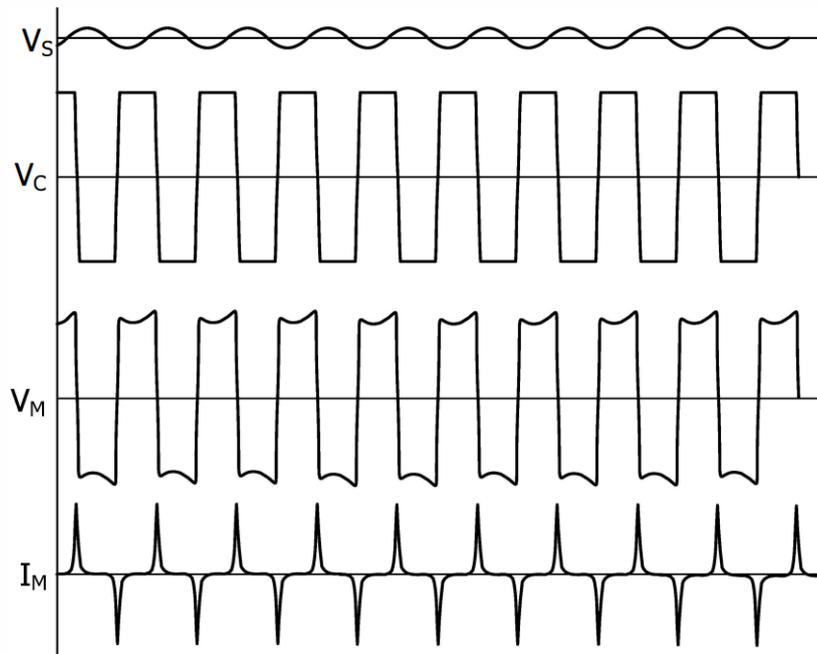


Figura 6 - Ferrorressonância de modo fundamental [22].

2.4.2 Modo sub-harmônico

O modo sub-harmônico compreende oscilações periódicas que possuem períodos múltiplos do período fundamental (V_S), repetindo-se de forma uniforme, conforme exemplificado na Figura 7. Os semiciclos positivos e negativos podem apresentar simetria ou assimetria. O conteúdo da frequência é descrito como tendo um espectro de frequências igual a f_s/n (onde f_s é o frequência da fonte e n é um número inteiro) [9, 26].

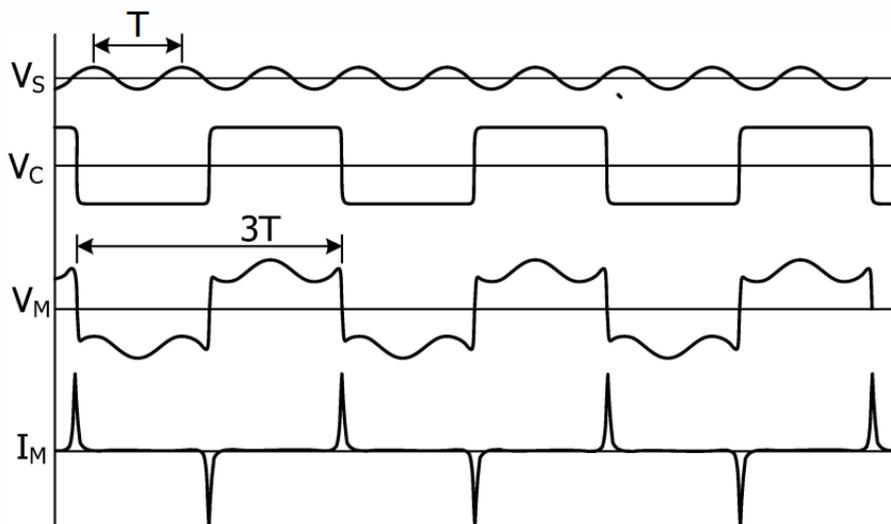


Figura 7 - Ferrorressonância de modo sub-harmônico (20 Hz) [22].

2.4.3 Modo quase periódico

Algumas formas de onda de ferorrressonância são mostradas na figura 8 e têm padrões repetidos que parecem periódicos, mas têm diferentes magnitudes de pico a cada repetição e períodos que não são totalmente iguais. Neste modo, os sinais de frequência são expressos na forma $nf_x + mf_y$ (onde m e n são números inteiros e f_x/f_y é um número real irracional). Eles são referidos como quase periódicos por causa de sua semelhança com uma forma de onda periódica [9, 26].

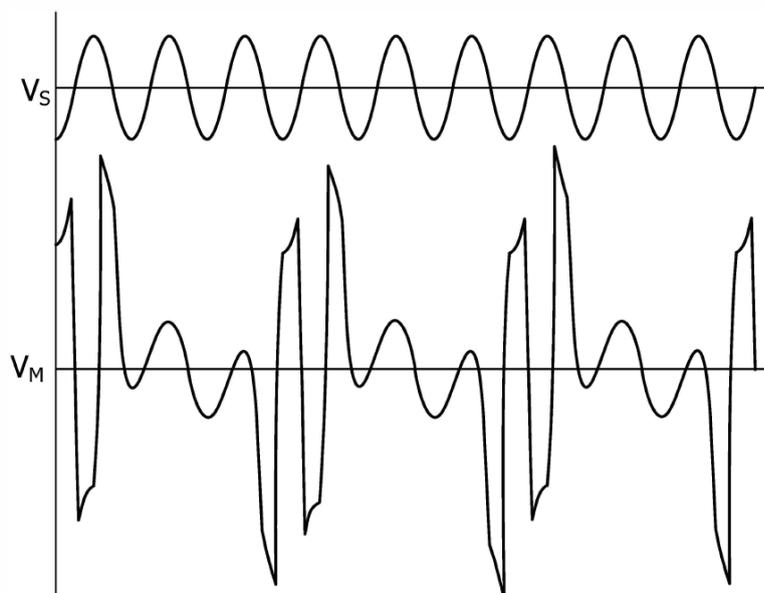


Figura 8 - Ferorrressonância de modo quase periódico [22].

2.4.4 Modo caótico

A oscilação ocorre no período após a perturbação transitória inicial e antes de se estabelecer em um dos modos de ferorrressonância mencionados anteriormente. Durante essa fase de busca por um ponto de operação estável, a dinâmica do sistema pode parecer caótica, tendo um espectro de frequência não periódico que é contínuo [26].

Esse processo de busca é caracterizado por formas de onda não periódicas e variações nas magnitudes das tensões, criando um ambiente caótico. Em algumas situações, esse processo de busca pode perdurar indefinidamente [9, 22].

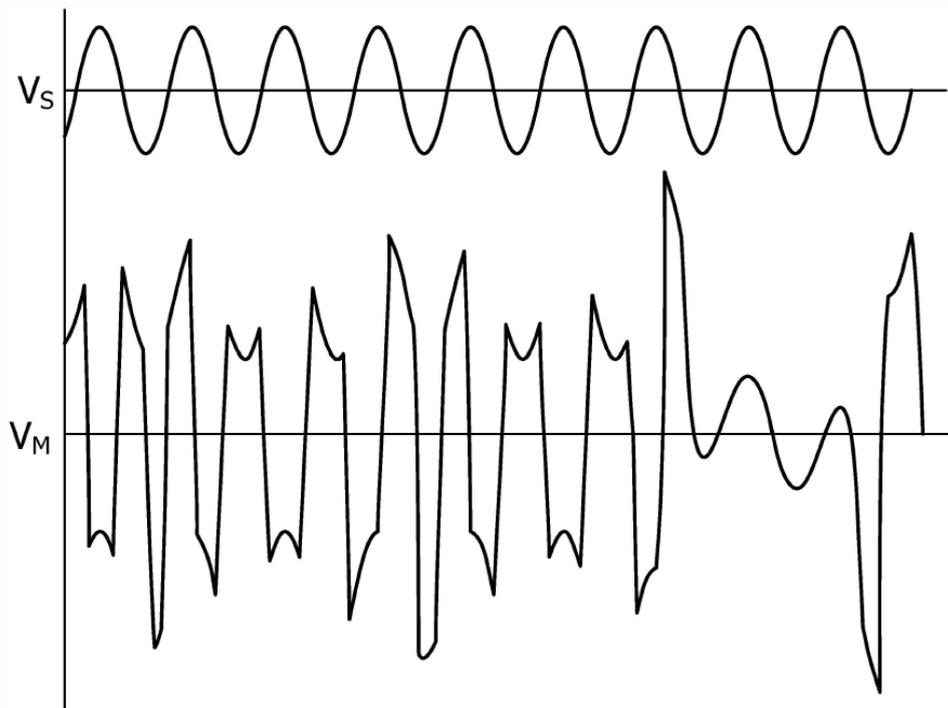


Figura 9 - Ferrorressonância de modo caótico [22].

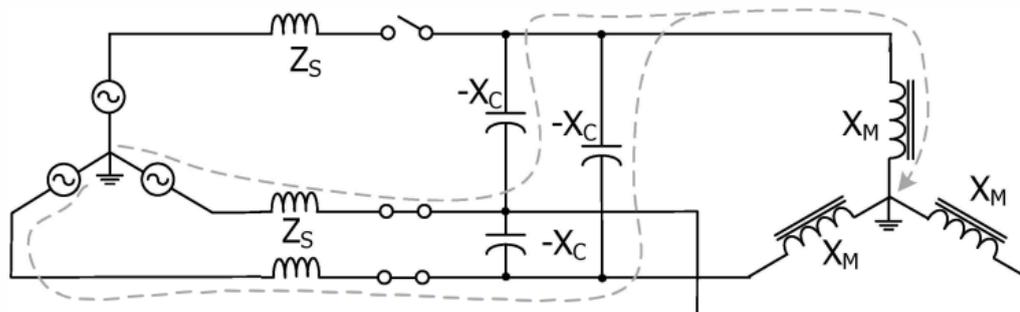
2.5 Categorias de circuitos ferrorressonantes

O circuito ferrorressonante básico é composto pela reatância de magnetização não linear de um transformador, com perdas muito baixas nos núcleos ferromagnéticos e carga, uma fonte de tensão do sistema e uma capacitância equivalente em série. No entanto, deve-se ressaltar que existem diversas configurações possíveis de circuitos ferrorressonantes. Em [5], são identificados sete categorias diferentes de sistemas elétricos propensos a ferrorressonância. A seguir, será apresentada uma breve discussão sobre alguns casos bastante comuns.

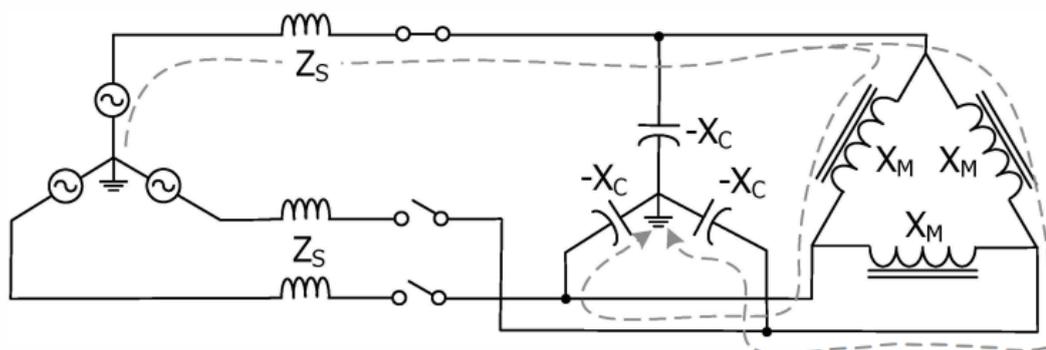
2.5.1 Comutação desbalanceada

Essa condição é mais comumente observada em sistemas de distribuição, onde as fases abertas podem resultar de fusíveis queimados ou de chaveamento monofásico. Também pode ocorrer em aplicações de chaveamento trifásico, quando há uma operação desbalanceada não intencional, como um polo preso durante a abertura do disjuntor [22]. Essa condição é ilustrada nas Figuras 10(a) e 10(b), onde $-X_C$ representa as capacitâncias da rede, X_M representa a reatância dos transformadores e as linhas tracejadas identificam os possíveis caminhos para a corrente ferrorressonante. A tensão da fonte é fornecida pela(s) fase(s) conectada(s) restante(s).

A capacitância em série (Z_S) está associada às características do condutor, como cabo, linha de transmissão, barramento, entre outros.



(a) Comutação monofásica com acoplamento através de capacitância fase-fase



(b) Comutação bifásica com acoplamento através de capacitância fase-terra

Figura 10 - Comutações desbalanceadas [22].

2.5.2 Transformador de potencial conectado a um sistema com neutro isolado

Em sistemas de energia não aterrados, a utilização de transformadores de potencial (TPs) conectados fase-terra pode expor esses dispositivos ao fenômeno de ferorrressonância. Isso ocorre devido ao fato de que, em sistemas não aterrados, o ponto neutro não está conectado à terra, resultando em oscilações de sequência zero que são fracamente amortecidas [28].

A ferorrressonância é particularmente relevante nesse contexto, uma vez que a falta de aterramento do ponto neutro contribui para uma menor capacidade de dissipação de energia. Assim, qualquer acoplamento capacitivo entre o sistema e os TPs pode resultar em oscilações indesejadas que, em última análise, podem prejudicar a operação desses transformadores e comprometer a segurança do sistema elétrico como um todo. Portanto, é crucial considerar cuidadosamente as implicações da ferorrressonância ao implantar TPs em sistemas não

aterrados.

Embora nem sempre seja evidente, deve-se destacar que os transformadores de potencial (TP) conectados fase-terra, como mostrado na Figura 11, representam uma categoria adicional de circuitos suscetíveis à ferorrressonância. Essa configuração específica em sistemas não aterrados pode levar ao surgimento desse fenômeno indesejado.

Deve-se evitar o uso dessas configurações sempre que possível. No entanto, em situações temporárias, onde a conexão fase-terra do TP em sistemas isolados é necessária devido a operações específicas do sistema, precauções adequadas devem ser tomadas. É necessário um planejamento cuidadoso e a implementação de medidas de proteção apropriadas para minimizar os riscos associados à ferorrressonância nesses casos.

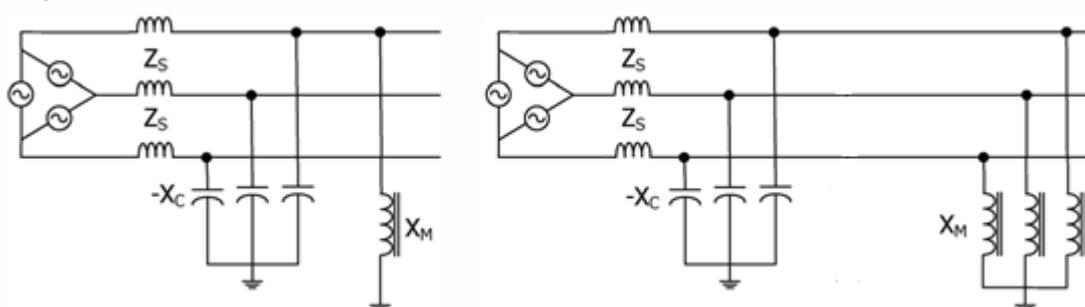


Figura 11 - TPs aplicados em sistemas não aterrados [22].

2.5.3 Transformador energizado através da capacitancia de equalização de um ou mais disjuntores

Os disjuntores de alta tensão, em geral, requerem múltiplos contatos em série para distribuir uniformemente o estresse de tensão transitória durante a interrupção de falhas. Para garantir uma distribuição uniforme de tensão durante esse processo, capacitores de equalização são conectados a cada contato, conforme demonstrado na Figura 12. A capacitância equivalente do conjunto depende tanto do número de contatos de interrupção quanto do valor dos capacitores de equalização. Um valor típico pode ser de 1300 pF, resultando em 650 pF para um disjuntor com dois contatos em série [22].

Além de garantir a distribuição uniforme de tensão, os capacitores de equalização também servem para melhorar a capacidade de interrupção de corrente do disjuntor se dimensionados adequadamente. Os capacitores TRT (tensão de restabelecimento transitória), podem ser instalados em paralelo aos contatos dos disjuntores. Assim, é viável que os disjuntores de contato único, que dispensam capacitores de equalização, possam utilizar um

capacitor TRT nos contatos.

Durante o isolamento de um barramento, vários disjuntores podem estar conectados, e a capacitância equivalente em série pode acoplar uma tensão significativa, V_S , ao barramento. Dependendo das condições mencionadas, essa configuração pode resultar em ferrorressonância no transformador. Embora os transformadores de potencial indutivos (TPI) sejam mais suscetíveis a esse fenômeno, os transformadores de potência também podem ser afetados, especialmente quando muitos disjuntores estão conectados ao barramento isolado.

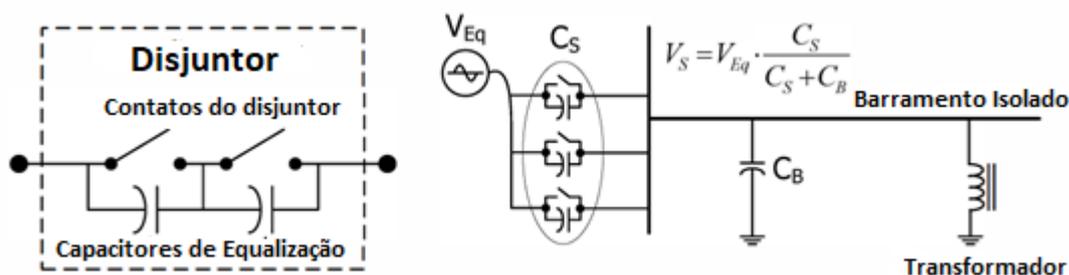


Figura 12 - Circuito ferrorressonante com capacitores de equalização do disjuntor. Adaptado de [22].

2.5.4 Transformador de potencial capacitivo

Os transformadores de potencial capacitivos (TPCs) desempenham um papel essencial em todo o sistema elétrico de média e alta tensão, convertendo tensões de linha em níveis de baixa tensão por meio de um divisor de potencial capacitivo acoplado a um transformador abaixador. Os sinais de saída dos TPCs são cruciais para monitorar e controlar o sistema de alta tensão, através de medidores e relés de proteção.

No entanto, os TPCs apresentam uma suscetibilidade significativa à ferrorressonância devido à natureza de seu projeto. Em situações em que ocorrem transitórios no sistema de potência, as tensões podem sofrer alterações abruptas tanto no primário quanto no secundário do TPC, o que, por sua vez, pode resultar em saturação do núcleo [29].

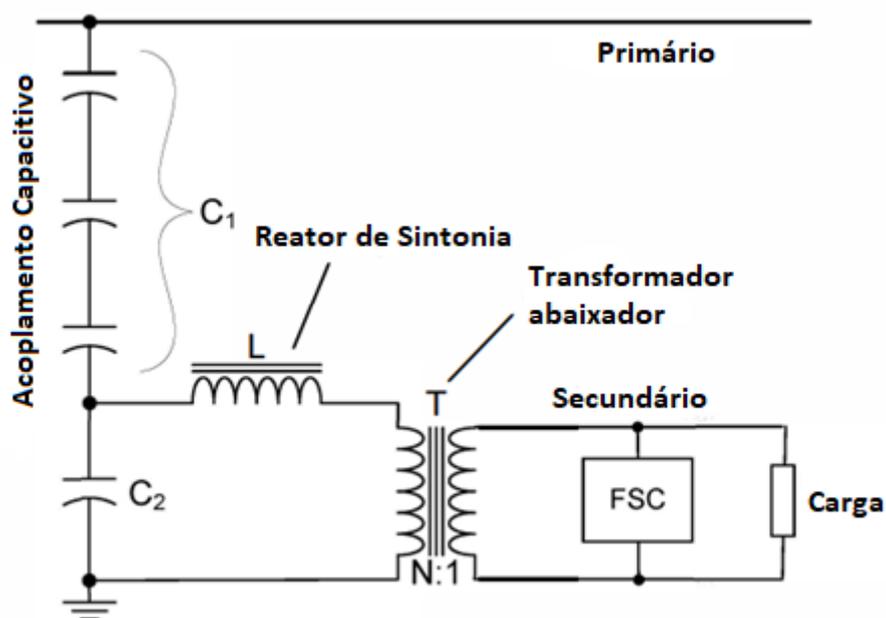
O fenômeno da ferrorressonância pode ser desencadeado caso as capacitâncias do sistema ressoem com o valor da indutância não linear saturada. Essas oscilações indesejadas podem afetar adversamente a resposta do TPC e transferir informações espúrias para os relés de proteção. Além disso, essas condições podem resultar em picos elevados de tensão e corrente entre os componentes, levando potencialmente à falha e até à explosão do TPC [26].

Para lidar com esse problema, os fabricantes fornecem diversos projetos de circuitos de supressão de ferrorressonância (FSC) aplicados em um enrolamento secundário. O circuito

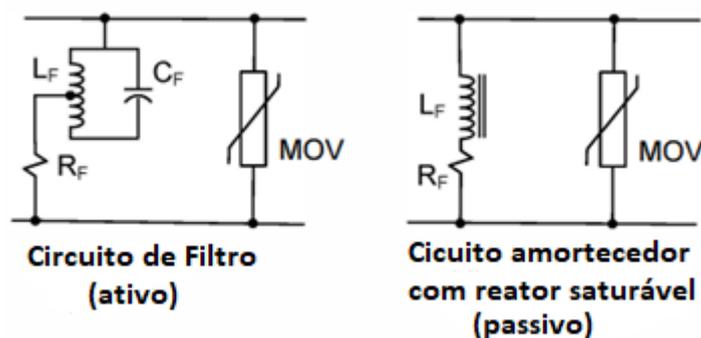
equivalente de um TPC típico, juntamente com o FSC, é ilustrado na Figura 13.

O filtro FSC é projetado para amortecer modos harmônicos e sub-harmônicos da ferorrressonância. O circuito utiliza um reator de saturação para alternar a resistência de amortecimento quando as tensões secundárias (e a densidade de fluxo) se tornam excessivas. Além disso, a adição de varistores de óxido metálico (MOVs) oferece proteção adicional contra surtos secundários e reduz o tempo de eliminação da ferorrressonância [22].

Deve-se ressaltar que, embora os FSCs sejam eficazes na eliminação da ferorrressonância, eles podem temporariamente afetar a exatidão da tensão medida no sistema e a operação de relés de proteção durante falhas. Esses efeitos devem ser avaliados cuidadosamente.



(a) Circuito equivalente do TPC



(b) Circuitos típicos de supressão de ferorrressonância com para-raios

Figura 13 - Circuito equivalente do TPC com FSC. Adaptado de [22].

2.5.5 Transformador conectado a uma linha isolada em paralelo com uma ou mais linhas energizadas

Um transformador conectado a uma linha isolada (desenergizada e não aterrada), que está fisicamente paralela e adjacente a uma linha energizada, pode estar sujeito à ferorrressonância. Esse fenômeno ocorre quando há um acoplamento capacitivo suficiente entre os dois circuitos [30], como mostrado na Figura 14. O acoplamento capacitivo, também conhecido como acoplamento eletrostático, depende principalmente da geometria entre os dois circuitos e do comprimento das linhas [22].

A presença desse acoplamento capacitivo pode permitir a transferência de energia entre os circuitos, resultando em oscilações indesejadas. A magnitude desse acoplamento é influenciada pela proximidade física das linhas, a distância entre elas e as características dielétricas dos materiais presentes.

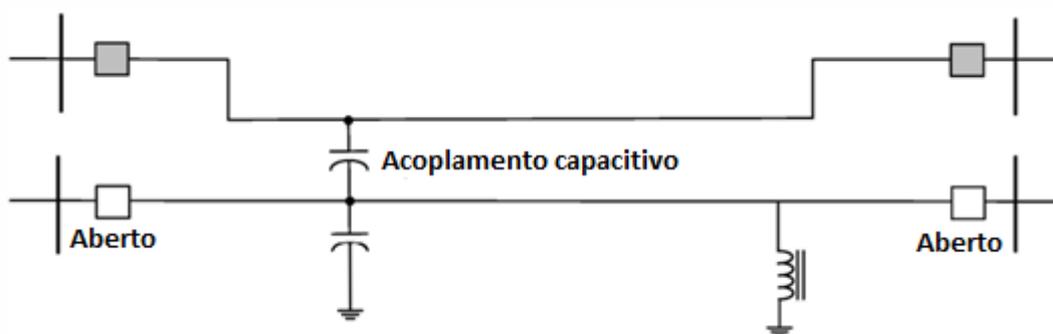


Figura 14 - TP em uma linha desenergizada próxima a uma linha energizada. Adaptado de [22].

Outras categorias de circuitos ferorrressonantes envolvem casos em que se tem transformadores conectados a uma linha de transmissão compensada em série, transformadores alimentados por meio de uma linha de transmissão ou cabo longo com baixa potência de curto-circuito, transformadores auxiliares conectados ao secundário de TPs ou TPCs, entre outros.

Portanto, é crucial entender que a ocorrência da ferorrressonância depende da interação complexa entre múltiplos fatores, sendo necessário considerar o tipo e o estado do sistema, os eventos de comutação e as características do transformador. Compreender esses elementos é fundamental para identificar as condições propícias para o surgimento da ferorrressonância e adotar medidas adequadas para mitigar seus efeitos indesejados.

2.6 Fundamentos de simulação de ferorrressonância

A análise fasorial é o método inicialmente utilizado para obter uma compreensão básica dos fenômenos de ferorrressonância. Esse método é aplicado principalmente em circuitos ferorrressonantes simples e precisos, onde as características não lineares do elemento indutivo podem ser consideradas de forma simplificada. No entanto, devido à diversidade de configurações de circuitos ferorrressonantes e às características não lineares dos elementos indutivos, métodos mais avançados de análise são frequentemente preferidos.

À medida que as configurações de circuitos se tornam mais complexas, torna-se necessário empregar modelos mais precisos e técnicas de análise mais sofisticadas. Nesse sentido, a análise no domínio do tempo, utilizando programas de simulação transitória, como EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), tem se mostrado eficaz. O EMTP permite a modelagem e a simulação de forma mais realista dos fenômenos de ferorrressonância, levando em consideração a não linearidade dos elementos indutivos e outros aspectos relevantes [20].

A ferorrressonância, por ser um fenômeno localizado, não demanda a construção de modelos extensos para fins de simulação. Na verdade, é necessária apenas a representação dos elementos essenciais, tais como a fonte, a impedância do sistema, a capacitância de equalização do disjuntor, as capacitâncias *shunt* e, crucialmente, a indutância não linear do transformador de potencial [31].

Um ponto-chave destacado por ZARE et al. [32] é a significância da seleção e representação precisa da curva de magnetização do elemento não linear. Essa escolha adequada é essencial para garantir que os resultados da simulação reflitam fielmente o comportamento do sistema real durante os episódios de ferorrressonância.

A representação da não linearidade do transformador de potencial pode ser alcançada por meio de duas abordagens principais: o uso de um laço de histerese ou a linearização por partes das características de magnetização. Embora a modelagem do laço de histerese possa resultar em simulações mais precisas em comparação com a linearização por partes, a negligência desse aspecto não é fator determinante para introduzir erros significativos. Ainda que a aproximação possa afetar os valores quantitativos de tensão, não se espera que influencie de forma substancial a ocorrência da ferorrressonância [31].

Em relação às perdas no ferro magnético, compreende-se que este é um fenômeno não linear. De acordo com EMIN et al. [20], é um fator importante no início da ferorrressonância, e a resistência que modela esse fenômeno deve ser representada de forma dinâmica. No entanto, estudos de comparação entre modelos de resistência fixa e dinâmica, conduzidos por

PIASECKI et al. [28], constataram que o nível das perdas no ferro tem, em muitos casos, um efeito insignificante nos resultados da ferorrressonância.

Outra fonte significativa de perdas na modelagem e simulação do fenômeno de ferorrressonância está associada à carga conectada ao enrolamento secundário do transformador de potencial. A carga consiste em todos os dispositivos conectados, como relés de proteção, instrumentos de medição e, se necessário, um dispositivo de amortecimento de ferorrressonância. Contudo, considerando que os relés eletrônicos modernos impõem uma carga mínima, as perdas relacionadas a esses dispositivos podem ser desprezadas neste caso [12].

Nas figuras 15 a 18, são apresentados alguns resultados de simulação para oscilações de ferorrressonância monofásica que seguem os critérios descritos acima.

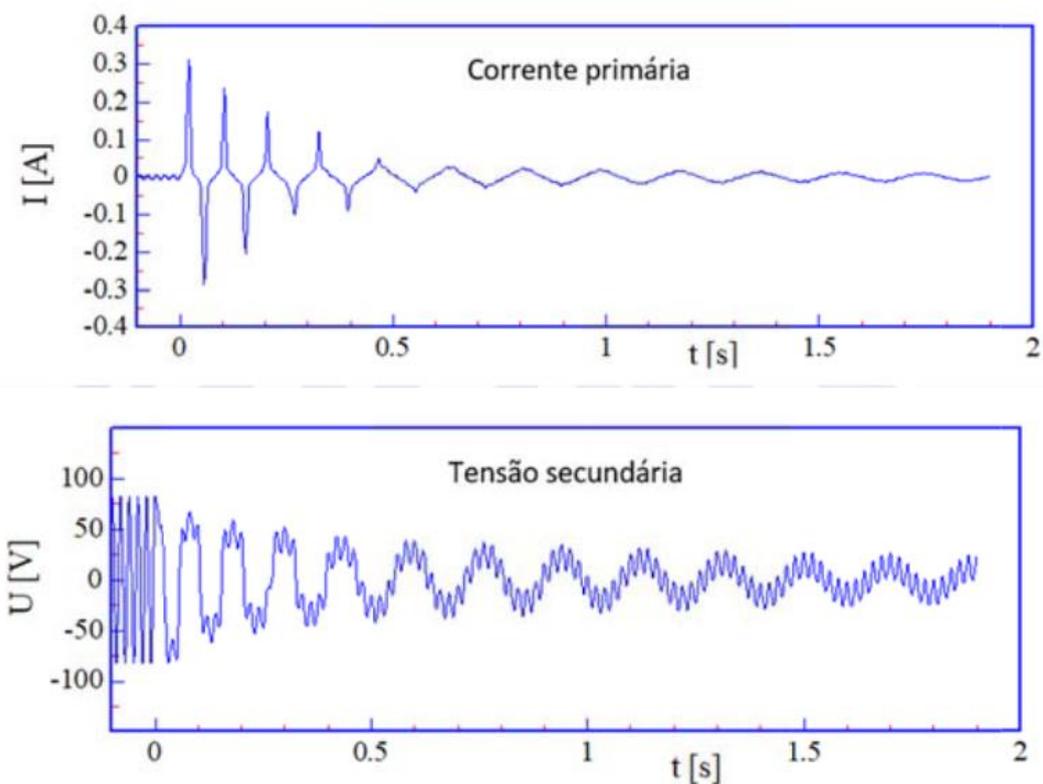


Figura 15 - Oscilação de ferorrressonância decrescente com quinto sub-harmônico 50/5 Hz [12].

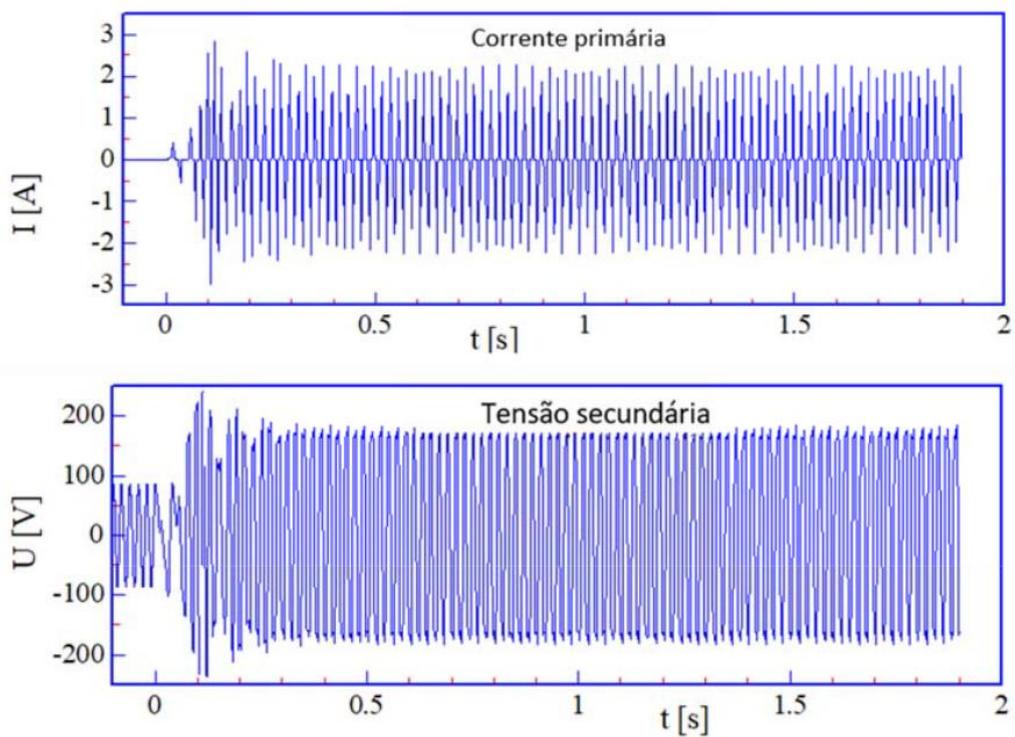


Figura 16 - Oscilação de ferrorressonância de regime estacionário na frequência de operação [12].

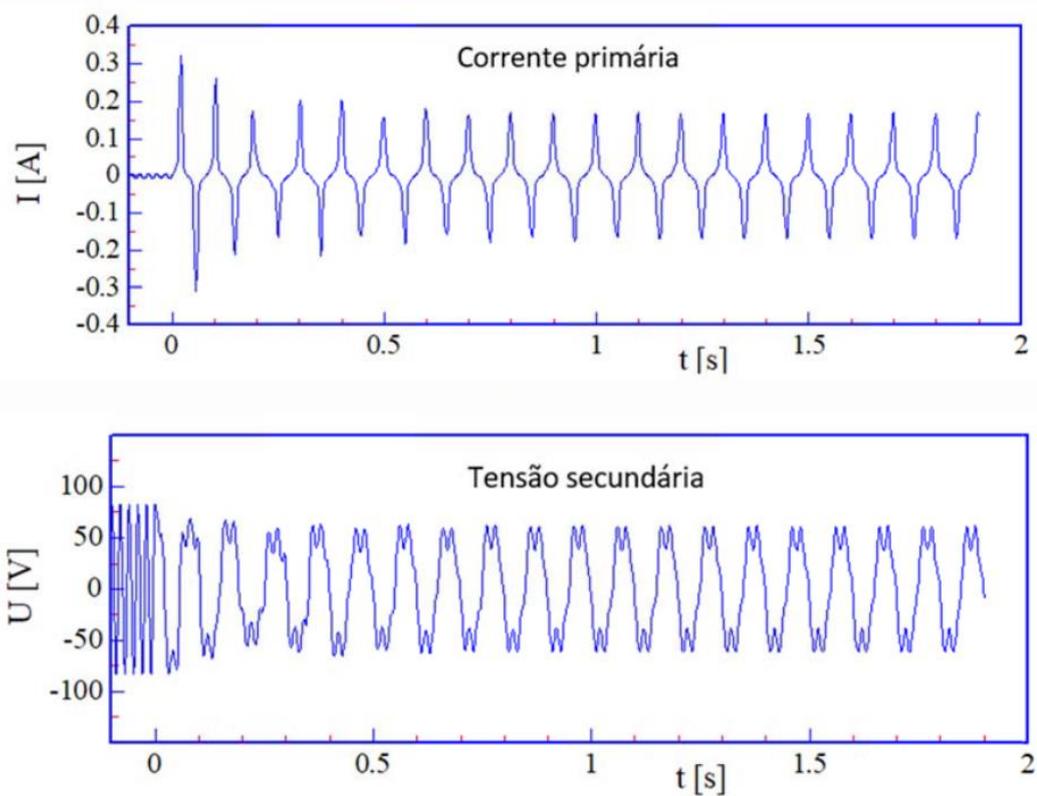


Figura 17 - Oscilação de ferrorressonância de regime estacionário com 10 Hz [12].

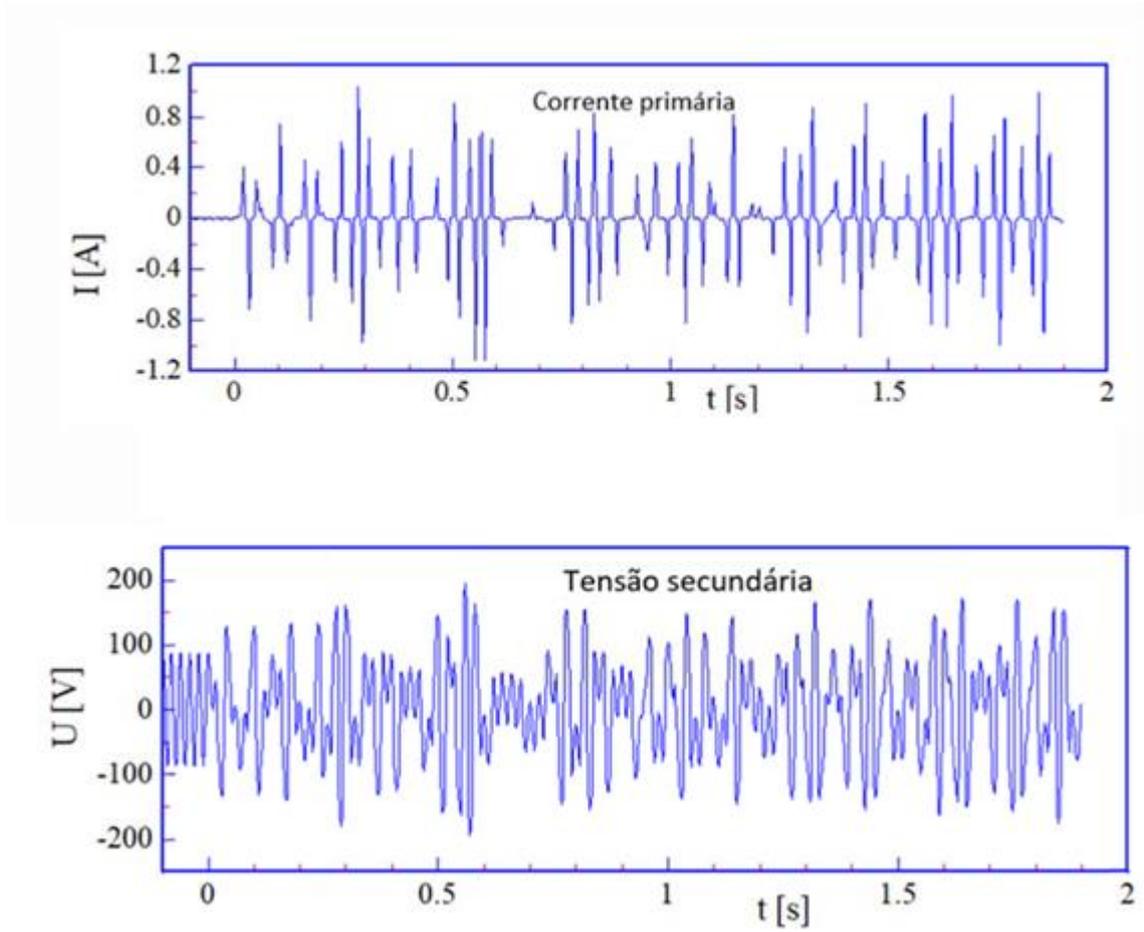


Figura 18 - Oscilação de ferorrressonância caótica de regime estacionário [12].

3 Procedimento Experimental e Simulação Computacional

O desenvolvimento do sistema de ensaio e análise do fenômeno de ferrorressonância surge em resposta à dificuldade enfrentada pelos fabricantes de equipamentos elétricos em encontrar laboratórios capazes de realizar esse tipo específico de procedimento. Essa demanda crescente por ensaios relacionados à ferrorressonância motivou a iniciativa do LAT-EFEI em criar um ambiente adequado para tais análises.

Com o objetivo de atender às principais necessidades do mercado e aproveitar as capacidades do laboratório, o procedimento foi elaborado com foco na análise da ferrorressonância monofásica, especialmente aquela iniciada por meio da comutação de disjuntores com capacitância de equalização.

A condução experimental e análise da ferrorressonância neste trabalho foi realizada, integrando-se harmoniosamente com ensaios já estabelecidos e claramente definidos por normas específicas. Com o intuito de garantir uma abordagem robusta e segura, recorreu-se à modelagem e simulação prévia, proporcionando uma ferramenta essencial para a determinação dos valores de capacitância e oferecendo uma visão antecipada dos resultados esperados.

Tanto nas simulações quanto na execução dos ensaios, foi assumido o pior cenário, no qual o secundário do TP estava em vazio. O fluxograma apresentado na Figura 19 detalha as etapas do procedimento de ensaio realizadas em cada amostra de TP.

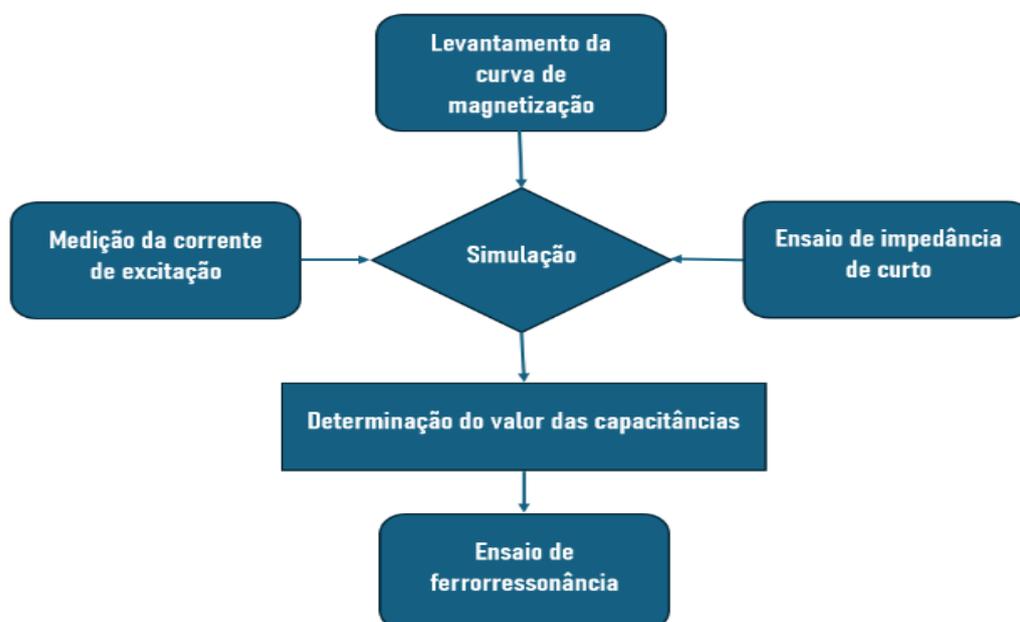


Figura 19 - Fluxograma do procedimento de ensaio.

3.1 Características dos transformadores de potencial (TPs) utilizados neste trabalho

No cenário atual, observa-se um crescente número de ocorrências do fenômeno de ferrorressonância, com destaque para sua manifestação em fazendas eólicas. Estas fazendas, compostas por uma rede complexa de equipamentos, apresentam múltiplos transformadores de potencial desempenhando um papel crucial na medição precisa de tensões e na proteção eficaz desses sistemas.

Os transformadores de potencial são projetados com uma potência nominal geralmente muito baixa devido à sua função metrológica, em contraste com os transformadores de potência, que são fontes de alimentação. As correntes nominais no enrolamento de alta tensão são tipicamente da ordem de um único miliampere na tensão nominal. Além disso, os TPs têm uma capacidade térmica relativamente baixa em comparação com os transformadores de potência, o que os torna muito sensíveis ao problema de ferrorressonância e, conseqüentemente, a falhas e danos permanentes ao equipamento.

Com o intuito de validar o sistema de ensaio desenvolvido e alinhá-lo às demandas específicas do mercado, foram utilizadas cinco amostras de TPs neste trabalho, provenientes de dois fabricantes distintos, fabricante A e fabricante B, cada um empregando tecnologias de fabricação singulares. Destaca-se na Tabela 1 as principais características dessas amostras, enquanto uma visão de cada exemplar pode ser visto na Figura 20.

Tabela 1 - Características das amostras de TPs

Amostra	Tipo	U_p [V]	U_s [V]	f [Hz]
A01	TPI	$13800/\sqrt{3}$	115	60
A02	TPI	$13200/\sqrt{3}$	$120/\sqrt{3}$	60
A03	TPI	$13800/\sqrt{3}$	115	60
B04	TPI	$13800/\sqrt{3}$	115	60
A05	TPC	$13800/\sqrt{3}$	$115/\sqrt{3}$	60

É importante ressaltar que a amostra A05 se trata de um protótipo desenvolvido pelo fabricante A, com características predominantemente capacitivas, marcada por uma tecnologia de construção distinta dos demais modelos testados.



Figura 20 - Amostras de TPs.

Essa abordagem envolvendo amostras de diferentes origens e tecnologias busca proporcionar uma compreensão mais holística do comportamento do sistema diante do fenômeno de ferorrressonância, considerando as variações presentes nos equipamentos de diferentes fabricantes.

3.2 Levantamento da curva de magnetização

Com o intuito de obter a curva de magnetização e identificar o ponto de saturação do transformador de potencial em análise, procedeu-se à alimentação do secundário com tensão senoidal em frequência nominal, mantendo o primário em vazio. Durante esse processo, a tensão foi ajustada, variando de menos de 0,5 p.u. de tensão nominal, até ultrapassar 1 p.u., encerrando o ensaio ao se observar efeitos de saturação na amostra.

Ao longo desse procedimento, tanto a corrente quanto a tensão secundária foram medidas, registradas e, posteriormente, convertidas em valores por unidade (p.u.). Os dados resultantes foram então inseridos no software de simulação, proporcionando uma representação efetiva da curva de saturação da amostra.

3.3 Ensaio de Impedância de Curto

Com o intuito de determinar o valor e as componentes da impedância série do transformador de potencial indutivo, adotou-se o método (a) estipulado pela norma ABNT NBR 6855/21 [33], denominado método da tensão de curto-circuito. Este procedimento envolveu a aplicação, no secundário do TPI, de uma corrente senoidal de frequência nominal, calculada

como a razão entre a potência térmica e a tensão nominal do enrolamento, enquanto os terminais primários permaneciam curto-circuitados.

Durante a execução do ensaio, foram registrados os valores da corrente aplicada ao TPI, a tensão medida no secundário e a defasagem entre essas grandezas. Estes dados, posteriormente, foram utilizados no cálculo da impedância de curto-circuito do TPI, outro parâmetro de significativa importância no modelo de simulação.

3.4 Medição da corrente de excitação

Com o propósito de determinar a corrente de excitação, essencial para calcular a resistência de magnetização do transformador de potencial indutivo, conduziu-se um ensaio em conformidade com as diretrizes da norma ABNT NBR 6855/21 [33]. Este procedimento envolveu a aplicação de uma tensão senoidal, na frequência nominal, ao enrolamento secundário, enquanto o primário permanecia em circuito aberto.

Ao longo do ensaio, foram registrados os valores de tensão aplicada, a corrente medida no secundário e a defasagem entre essas grandezas. Posteriormente, esses dados foram empregados no cálculo da resistência de magnetização do TPI, um valor crucial que integra o modelo de simulação.

3.5 Desenvolvimento do Modelo de Simulação

Para obter uma compreensão abrangente e precisa da ferorrressonância, foram realizadas modelagens e simulações simplificadas utilizando uma versão do EMTP denominado ATP (*Alternative Transients Program*) [34]. Essas simulações permitiram explorar de forma mais detalhada os efeitos do fenômeno em diferentes configurações de circuitos e identificar medidas de mitigação adequadas para evitar problemas associados à ferorrressonância. Os próximos parágrafos descrevem os elementos utilizados no modelo.

O modelo desenvolvido apresenta uma estrutura que visa representar as condições operacionais de um sistema suscetível a ferorrressonância e capturar com precisão as grandezas relacionadas ao fenômeno. Dentre seus principais componentes, destaca-se uma fonte de tensão senoidal de 60 Hz, simbolizando o elemento ou conjunto de elementos que alimentam o circuito principal.

Uma chave controlada por tempo foi incorporada ao modelo, representando o disjuntor responsável pelas operações de energização e desenergização, no qual foi configurada para

realizar a abertura em um tempo fixo de $t = 2$ s.

Para simular a não linearidade presente no núcleo, incluiu-se um elemento não linear *type-98*, enquanto um transformador monofásico ideal assegura a aplicação apropriada da relação de transformação entre o primário e o secundário do TPI.

Dois elementos resistivos foram introduzidos para modelar a resistência de magnetização do núcleo e a impedância série do enrolamento primário do TPI. Além disso, dois elementos capacitivos concentrados foram incluídos para representar o capacitor de equalização do disjuntor ou o capacitor série de compensação em um sistema de potência, bem como o capacitor *shunt*, que reflete a capacitância parasita total para a terra, presente principalmente em cabos isolados.

Finalmente, através da implementação do procedimento mencionado, foi possível desenvolver um modelo de simulação, conforme ilustrado na Figura 21. Além disso, para aquisitar os dados do fenômeno de ferrorressonância, foram distribuídos estrategicamente elementos de medição de tensão e corrente ao longo do circuito elétrico. Adicionalmente, foram introduzidos elementos resistivos para mitigar possíveis oscilações numéricas, assegurando assim a fidelidade dos resultados simulados.

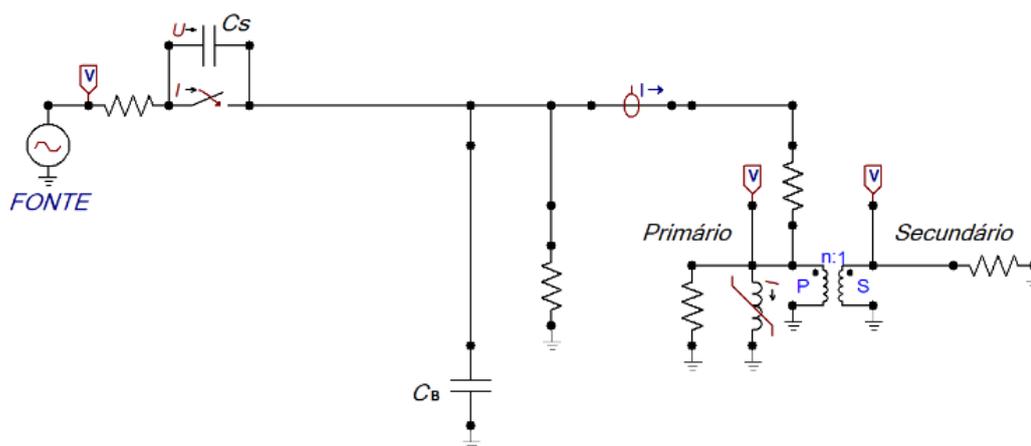


Figura 21 - Modelo de simulação completo para TPI.

Quanto ao TPC abordado neste trabalho, notável pela ausência de características indutivas, optou-se por utilizar exclusivamente capacitâncias para modelar tanto o primário quanto o secundário do equipamento, conforme ilustrado na Figura 22. Essa abordagem reflete a natureza capacitiva proeminente do dispositivo, sendo condizente com a sua resposta a estímulos elétricos.

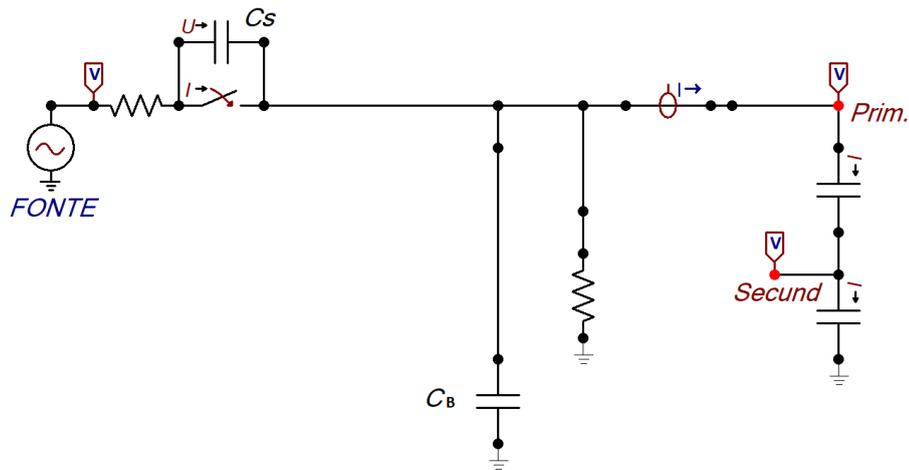


Figura 22 - Modelo de simulação completo para TPC.

3.5.1 Dados do elemento não linear e dos resistores série e de magnetização

Para a correta modelagem do elemento não linear, é necessário obter as características de magnetização do núcleo, que relacionam a densidade de fluxo magnético com a intensidade do campo magnético. No entanto, esses parâmetros não estão prontamente disponíveis para medição direta no TPI. Como alternativa, a curva de magnetização é frequentemente expressa como a relação entre a tensão aplicada e a corrente de magnetização na frequência de operação projetada.

A fim de contornar essa situação, recorreu-se à rotina *SATURATION*, uma funcionalidade integrada no software EMTP. Inicialmente, utilizou-se uma tabela contendo dados de tensão e corrente obtidos no ensaio de levantamento da curva de magnetização do TPI, conforme descrito na seção 3.2. Esses dados foram inseridos em um arquivo formatado adequadamente para gerar os valores de corrente e fluxo correspondentes. Esses resultados foram então incorporados ao arquivo principal de dados para a modelagem do elemento não linear do TPI.

Além disso, os valores dos elementos resistivos, que representam a impedância série do primário e a resistência de magnetização, mostraram-se imprescindíveis para uma simulação precisa. Desta forma, recorreu-se aos resultados obtidos nos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação para calcular, respectivamente, os valores da impedância série e da resistência de magnetização. Essa abordagem assegura que os parâmetros do modelo refletem com maior exatidão as características reais do transformador de potencial indutivo e contribui para uma simulação mais fiel do fenômeno de ferrorressonância.

As próximas subseções apresentam os dados de entrada, para cada amostra, obtidos nos ensaios de levantamento da curva de magnetização, impedância de curto-circuito e corrente de excitação. Adicionalmente, são apresentadas as curvas de magnetização, delineadas em relação à densidade de fluxo magnético e corrente elétrica. Os valores resultantes para a impedância série e resistência de magnetização foram calculados tomando-se a parte real da razão entre a tensão e a corrente nos respectivos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação refletidos para o primário.

3.5.1.1 Amostra A01

Os valores de tensão e corrente obtidos no ensaio de levantamento da curva de magnetização estão representados na Tabela 2, enquanto a curva de saturação determinada por meio da rotina *SATURATION* é mostrada na Figura 23.

Tabela 2 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A01

Tensão (V)	Corrente (mA)	Tensão (p.u.)	Corrente (p.u.)
35,0	19,5	0,30	0,0045
45,0	22,5	0,39	0,0052
55,0	25,5	0,48	0,0059
65,0	29,0	0,57	0,0067
75,0	32,5	0,65	0,0075
85,0	36,8	0,74	0,0085
95,0	42,3	0,83	0,0097
105,0	49,3	0,92	0,0113
115,0	58,6	1,00	0,0135
125,0	71,7	1,09	0,0165
135,0	93,1	1,18	0,0214

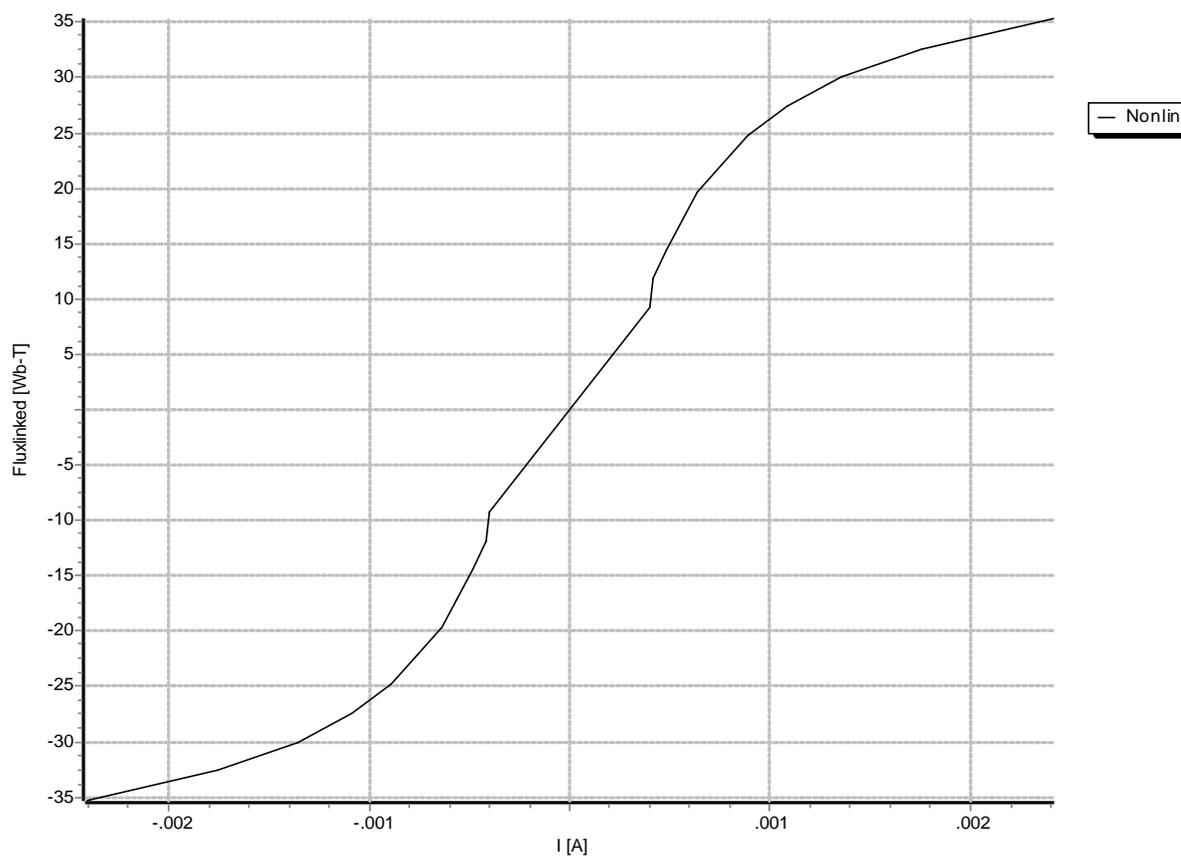


Figura 23 - Curva de saturação da amostra A01.

As Figuras 24 e 25 apresentam os dados obtidos nos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação, respectivamente, para a amostra A01.

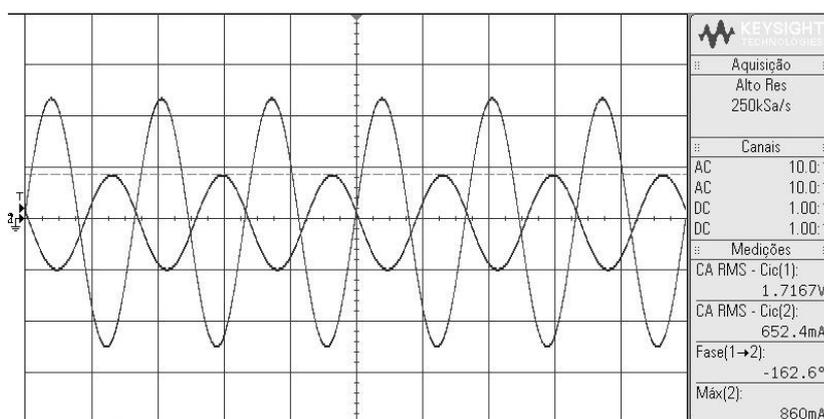


Figura 24 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A01.

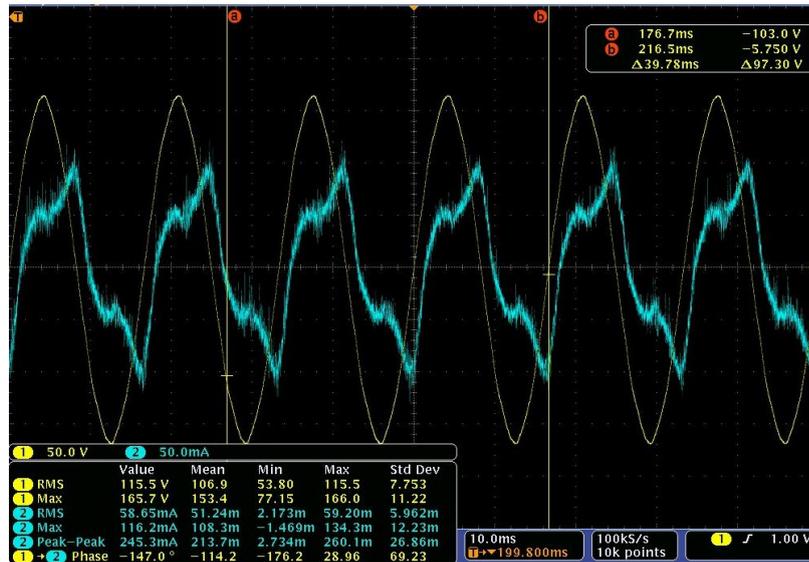


Figura 25 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A01.

3.5.1.2 Amostra A02

Os valores de tensão e corrente obtidos no ensaio de levantamento da curva de magnetização estão representados na Tabela 3, enquanto a Figura 26 apresenta visualmente a curva de saturação determinada por meio da rotina *SATURATION*.

Tabela 3 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A02

Tensão (V)	Corrente (mA)	Tensão (p.u.)	Corrente (p.u.)
10,0	25,0	0,14	0,0035
20,0	35,8	0,29	0,0050
30,0	48,3	0,43	0,0067
40,0	60,0	0,58	0,0083
50,0	74,0	0,72	0,0103
60,0	90,6	0,87	0,0126
65,0	102,3	0,94	0,0142
70,0	116,1	1,01	0,0161
75,0	128,5	1,08	0,0178
80,0	155,5	1,15	0,0216
90,0	242,8	1,30	0,0336

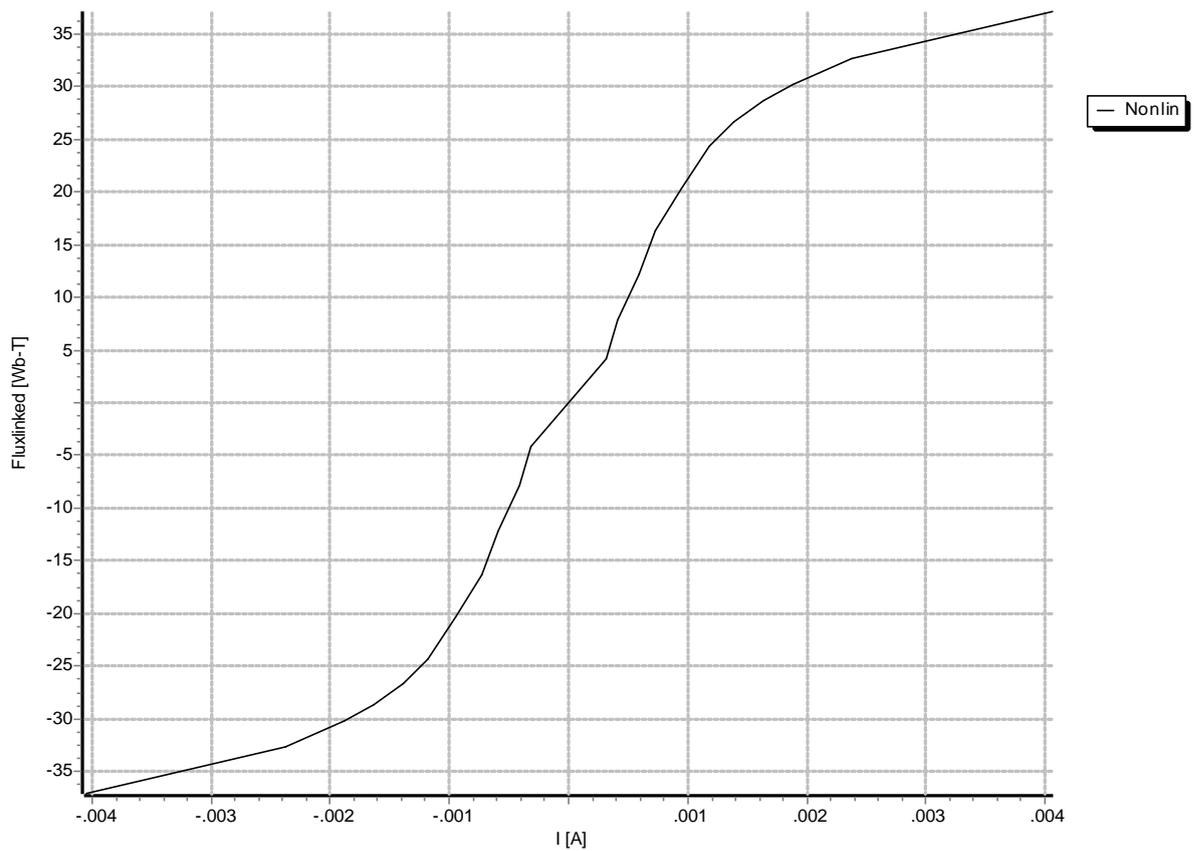


Figura 26 - Curva de saturação da amostra A02.

As Figuras 27 e 28 apresentam os dados obtidos nos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação, respectivamente, para a amostra A02.

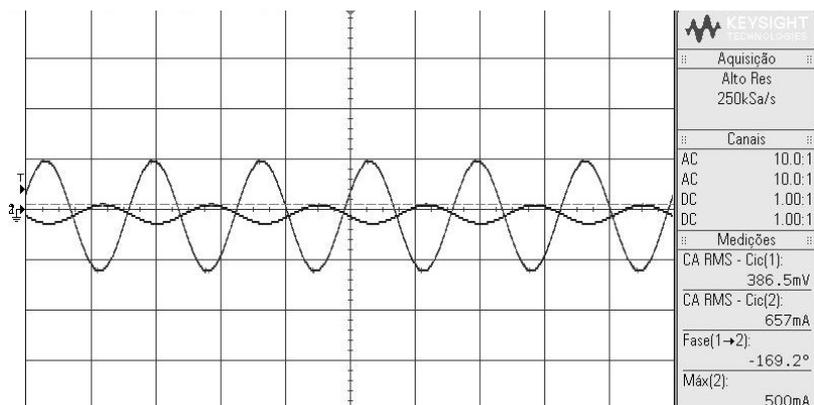


Figura 27 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A02.

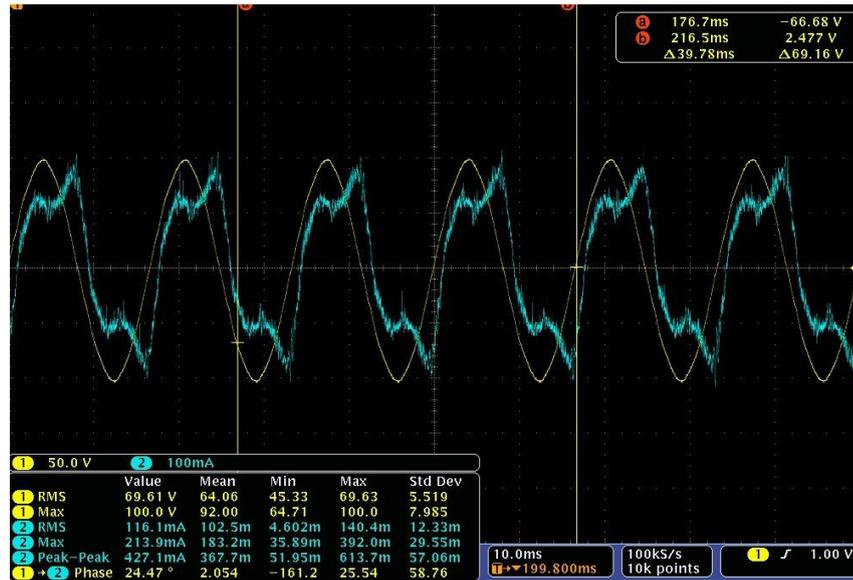


Figura 28 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A02.

3.5.1.3 Amostra A03

Os valores de tensão e corrente obtidos no ensaio de levantamento da curva de magnetização estão representados na Tabela 4, enquanto a Figura 29 apresenta visualmente a curva de saturação determinada por meio da rotina *SATURATION*.

Tabela 4 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra A03

Tensão (V)	Corrente (mA)	Tensão (p.u.)	Corrente (p.u.)
35,0	15,5	0,30	0,0036
45,0	18,4	0,39	0,0042
55,0	20,3	0,48	0,0047
65,0	21,4	0,57	0,0049
75,0	22,6	0,65	0,0052
85,0	24,9	0,74	0,0057
95,0	27,0	0,83	0,0062
105,0	28,8	0,91	0,0066
115,0	31,8	1,00	0,0073
125,0	32,7	1,09	0,0075
135,0	35,1	1,17	0,0081
145,0	37,6	1,26	0,0086
155,0	40,6	1,35	0,0093
165,0	43,8	1,43	0,0101
175,0	50,8	1,52	0,0117
185,0	65,2	1,61	0,0150

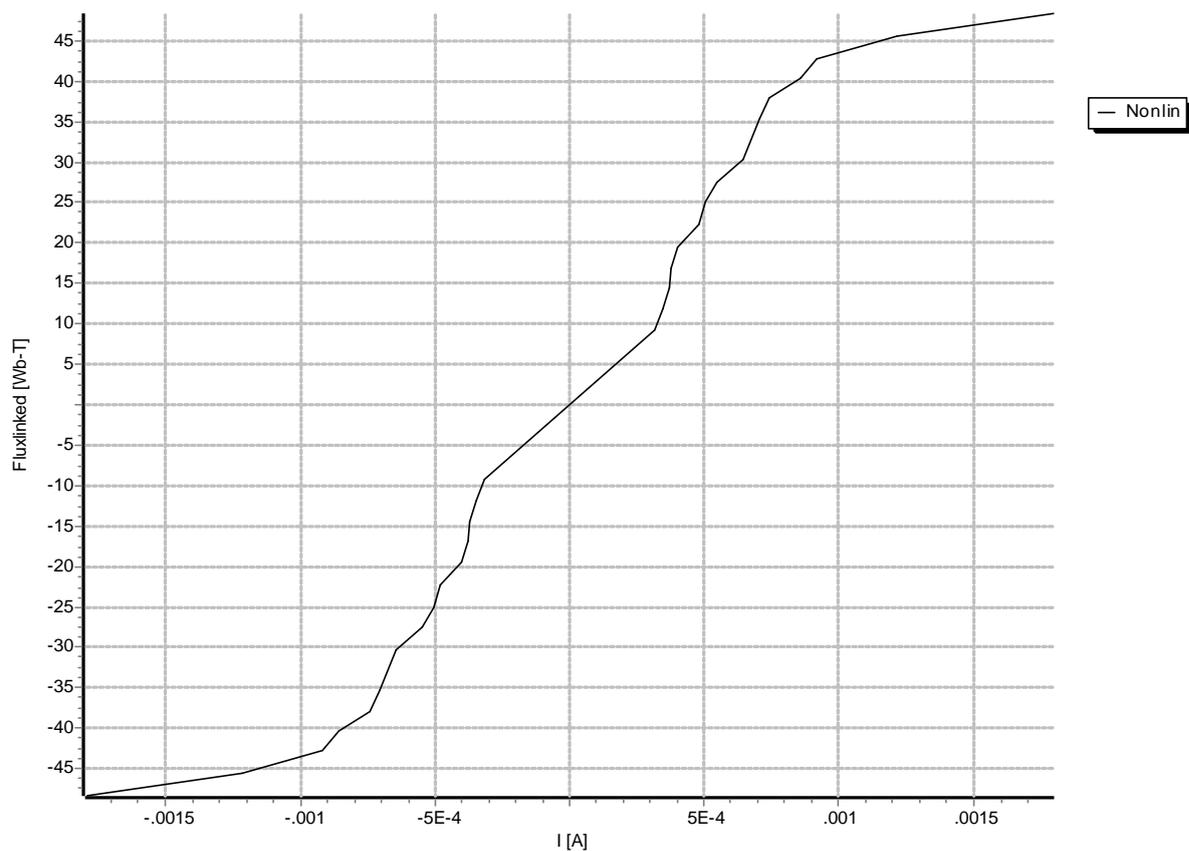


Figura 29 - Curva de saturação da amostra A03.

As Figuras 30 e 31 apresentam os dados obtidos nos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação, respectivamente, para a amostra A03.

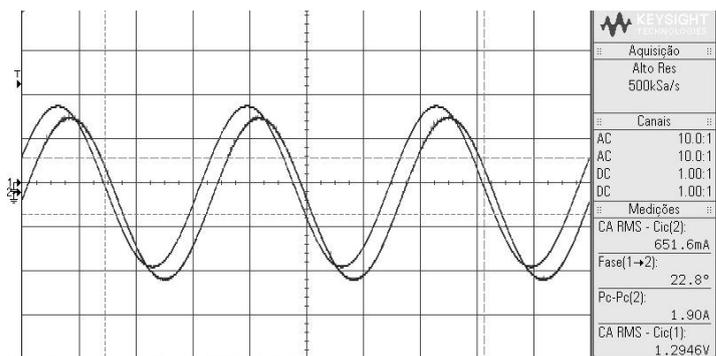


Figura 30 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra A03.

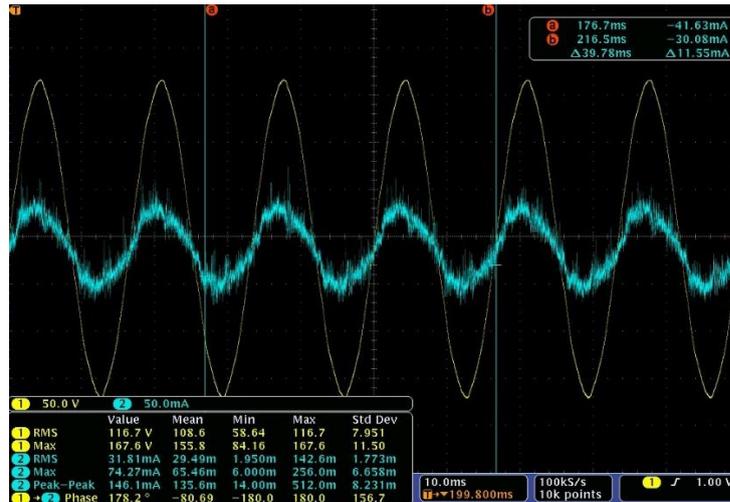


Figura 31 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra A03.

3.5.1.4 Amostra B04

Os valores de tensão e corrente obtidos no ensaio de levantamento da curva de magnetização estão representados na Tabela 5, enquanto a Figura 32 apresenta visualmente a curva de saturação determinada por meio da rotina *SATURATION*.

Tabela 5 - Dados do levantamento da curva de magnetização da amostra B04

Tensão (V)	Corrente (mA)	Tensão (p.u.)	Corrente (p.u.)
35,0	39,7	0,30	0,0114
45,0	47,5	0,39	0,0137
55,0	55,3	0,48	0,0159
65,0	64,0	0,57	0,0184
75,0	71,5	0,65	0,0206
85,0	80,5	0,74	0,0231
95,0	87,6	0,83	0,0252
105,0	104,5	0,91	0,0300
115,0	125,7	1,00	0,0361
120,0	143,6	1,04	0,0413
125,0	170,3	1,09	0,0490
130,0	211,7	1,13	0,0609
135,0	273,2	1,17	0,0786

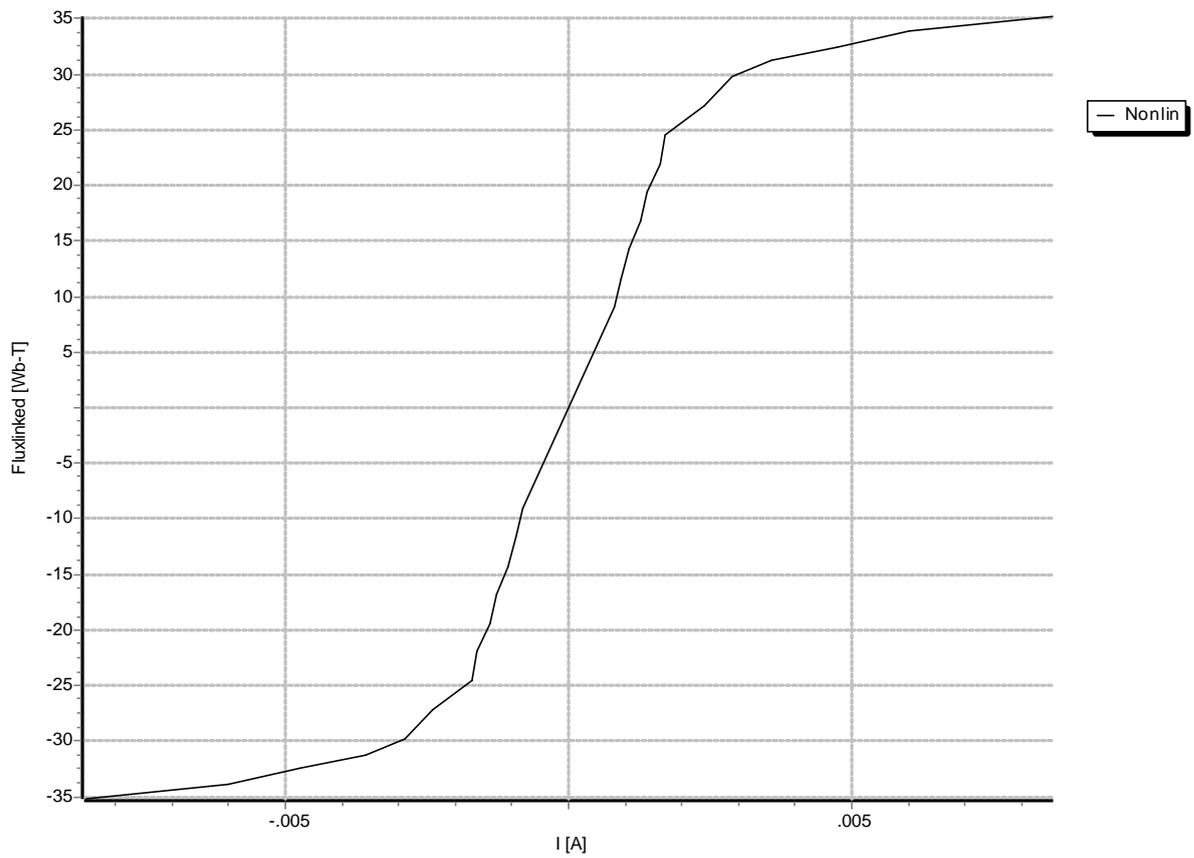


Figura 32 - Curva de saturação da amostra B04.

As Figuras 33 e 34 apresentam os dados obtidos nos ensaios de impedância de curto-circuito e corrente de excitação, respectivamente, para a amostra B04.

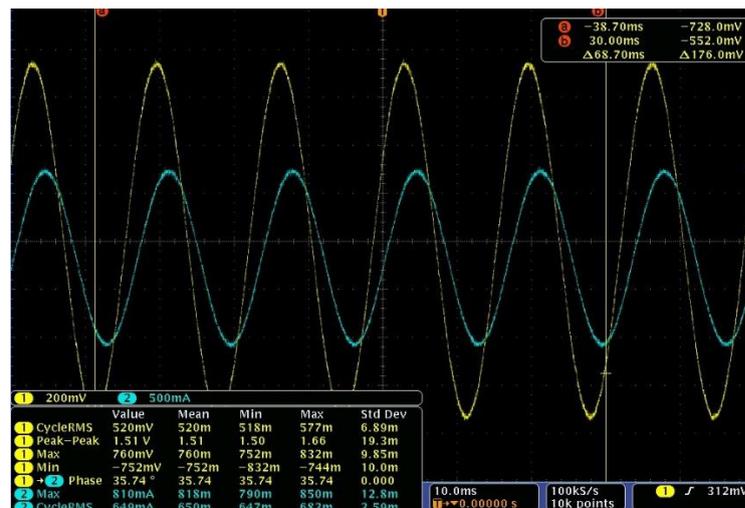


Figura 33 - Oscilograma do ensaio de impedância de curto da amostra B04.

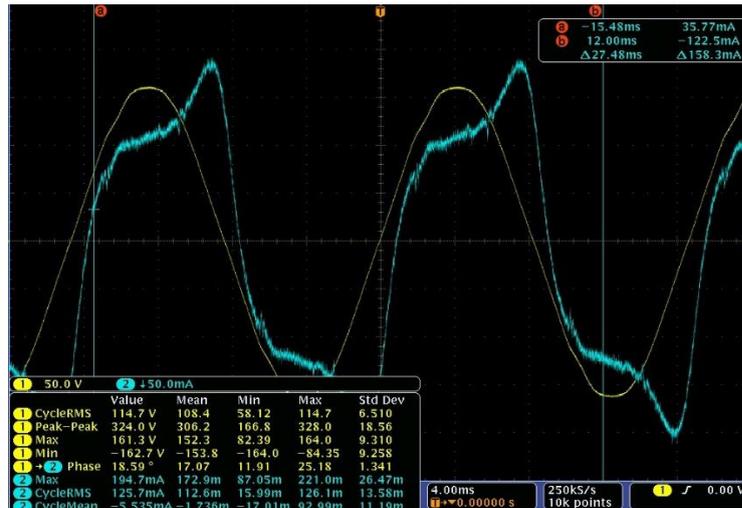


Figura 34 - Oscilograma do ensaio de corrente de excitação da amostra B04.

3.6 Desenvolvimento do sistema experimental de ferorrressonância

O sistema desenvolvido para os ensaios de ferorrressonância adere aos princípios estabelecidos no relatório técnico ABNT IEC/TR 61869-102 [12], pautando-se nas medições efetuadas durante os ensaios de chaveamento, a fim de verificar a ocorrência de oscilações ferorrressonantes em configurações específicas.

Os parâmetros selecionados para a detecção do fenômeno de ferorrressonância foram a corrente no enrolamento primário e a tensão secundária do TP. Para a medição da corrente primária, empregou-se o Método 1 do relatório técnico ABNT IEC/TR 61869-102 [12], utilizando um transdutor de corrente AC instalado ao redor da conexão de aterramento do enrolamento de alta tensão da amostra. Quanto à medição de tensão, optou-se por realizar a leitura diretamente no secundário do TP, sendo os valores de corrente e tensão enviados a um osciloscópio para uma análise conjunta. Essa abordagem proporciona uma avaliação detalhada do fenômeno de ferorrressonância, assegurando uma interpretação precisa dos resultados obtidos.

Os parâmetros escolhidos para variação, a fim de representar diversas configurações, abrangem a capacitância série do sistema, que simboliza tanto a capacitância de equalização do disjuntor quanto uma capacitância de compensação série em uma rede elétrica. Adicionalmente, a capacitância *shunt* foi incluída para representar, principalmente, as capacitâncias parasitas em sistemas de transmissão de energia elétrica, como cabos isolados e outros dispositivos relacionados ao aterramento.

Além disso, como parte integrante dessa metodologia de ensaio, foram empregados

dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, posicionados em série com o enrolamento primário do TP em teste. A imersão dos capacitores em óleo isolante proporcionou as condições necessárias de isolamento para o ensaio, enquanto um equipamento de medição da capacitância do sistema desempenhou um importante papel na obtenção de dados durante o procedimento experimental.

O circuito desenvolvido para a análise de ferrorressonância é ilustrado na Figura 35.

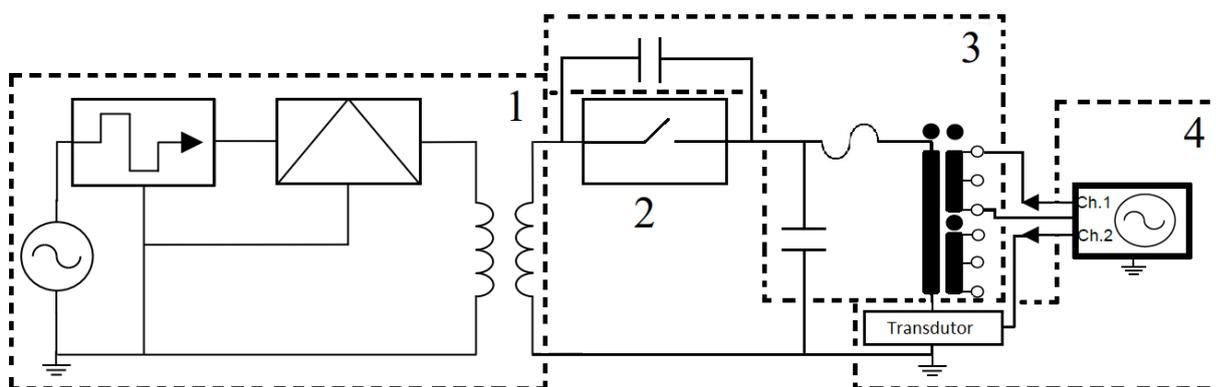


Figura 35 - Representação do circuito de ensaio de ferrorressonância

Os sistemas numerados no circuito são:

1. Sistema de Alimentação;
2. Sistema de Comutação;
3. Circuito Ferrorressonante;
4. Sistema de Medição.

3.6.1 Sistema de alimentação

O sistema de alimentação do arranjo desenvolvido é composto por três elementos principais: um gerador de funções Tektronix modelo AFG2021, um amplificador de sinais e um transformador monofásico de média tensão (45000 – 130 V). A operação desse sistema, inicia-se com a entrega da tensão da rede do laboratório pela concessionária local, que alimenta tanto o gerador de funções quanto o amplificador de sinais, mostrados na Figura 36.

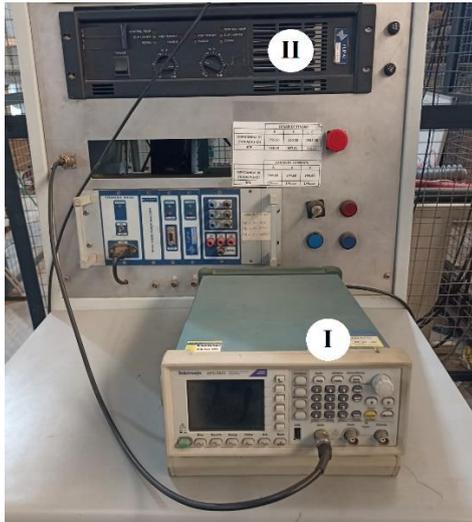


Figura 36 – (I) Gerador de funções; (II) amplificador de sinais.

O gerador de funções desempenha o papel de produzir um sinal senoidal de 60 Hz com amplitude controlada. Esse sinal é então encaminhado ao amplificador de sinais, cuja responsabilidade é amplificar o sinal gerado, preparando-o para ser entregue ao transformador de média tensão. O transformador, conforme mostrado na Figura 37, é alimentado pelos terminais de baixa tensão e sua saída, agora elevada para média tensão, é conectada ao disjuntor de média tensão, completando o ciclo de alimentação do arranjo experimental.



Figura 37 - Transformador monofásico

3.6.2 Sistema de comutação

A metodologia do ensaio desenvolvido foi pautada na realização de chaveamentos no sistema de testes, com o intuito de induzir transitórios. Isso permite acoplar a tensão de alimentação por meio do capacitor série de equalização ou compensação, expondo, assim, o transformador de potencial a possíveis oscilações não lineares de tensão e corrente.

Para a execução dos chaveamentos, foi empregado um disjuntor de média tensão, conforme apresentado na Figura 38, operado manualmente. O acionamento manual impede a determinação precisa do instante de chaveamento, um fator crucial na ocorrência ou não da ferorrressonância. Para contornar essa limitação, foram realizadas no mínimo três comutações para cada arranjo ensaiado, buscando abranger diferentes cenários e garantir a robustez dos resultados obtidos.



Figura 38 - Disjuntor de média tensão

3.6.3 Circuito ferorrressonante

O circuito ferorrressonante é composto pelo conjunto de módulos de capacitores que formam a capacitância total do sistema, como ilustrado na Figura 39. Cada módulo é constituído por dois capacitores, sendo 470 pF, 100 pF ou 10 μ F, conectados em série, resultando em uma capacitância de 235 pF, 50 pF ou 5 μ F, respectivamente. Para permitir a variação da

capacitância total do sistema, esses módulos foram fixados em barras condutoras e imersos em óleo, garantindo um isolamento eficaz.

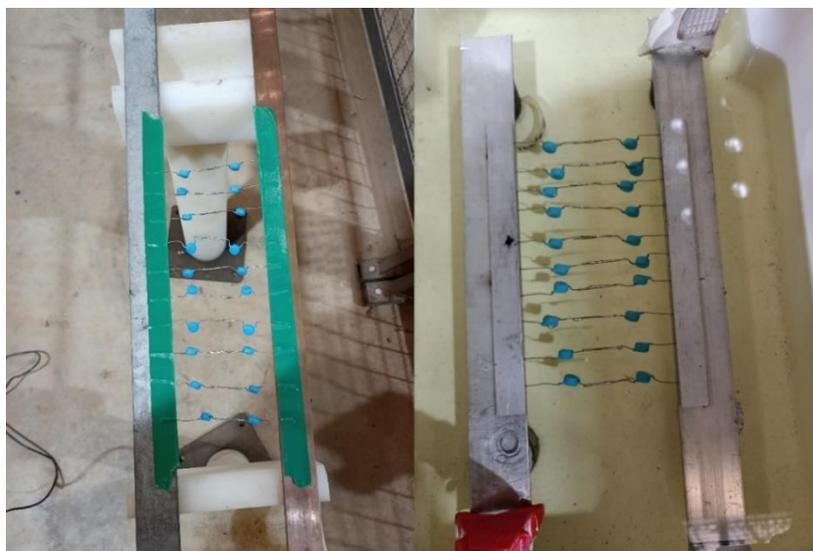


Figura 39 - Módulos de capacitores.

Adicionalmente, o circuito inclui o transformador de potencial a ser testado e as proteções aplicadas no primário da amostra ensaiada. Essa configuração proporciona um ambiente controlado para a análise de ferorrressonância, permitindo a manipulação das condições do sistema para investigação e validação experimental.

3.6.4 Sistema de medição

O sistema de medição do arranjo desenvolvido incorpora uma variedade de equipamentos dedicados ao monitoramento dos níveis e formas de onda da corrente primária e da tensão secundária do TP durante o ensaio. Além disso, a medição da capacitância total do sistema foi realizada no início de algumas séries de ensaios, com o propósito de verificar a integridade dos módulos de capacitância e a qualidade do contato destes com as barras condutoras.

Para monitorar a corrente, foi empregado um transdutor de corrente ($0,1 \text{ V / A}$) instalado ao redor da conexão de aterramento do enrolamento primário do TP, enquanto a tensão foi medida diretamente nos terminais secundários da amostra por meio de uma ponta de prova 100×1 conectada a um osciloscópio digital.

De forma adicional, um medidor de capacitâncias foi utilizado periodicamente para

mensurar a capacitância total do sistema e dos módulos de capacitores isolados. Além disso, dispositivos como multímetros digitais e cabos coaxiais foram integrados ao sistema de medição. A Figura 40 ilustra alguns desses dispositivos presentes no sistema de medição.

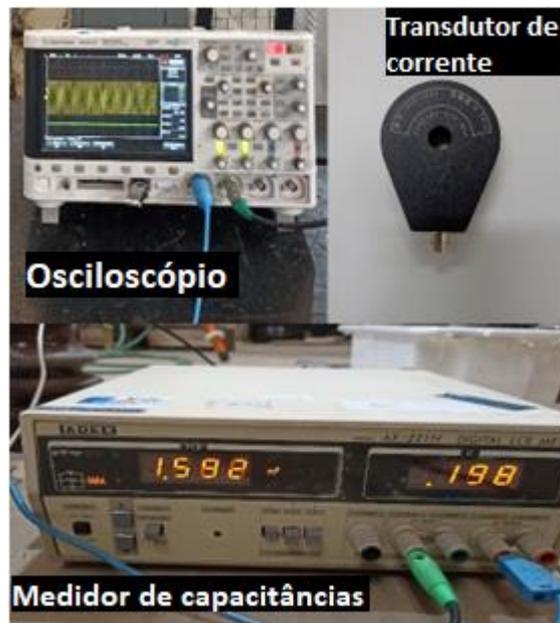


Figura 40 - Elementos do sistema de medição.

4 Resultados e Discussão

O arranjo desenvolvido encontra-se atualmente em funcionamento no LAT-EFEI, sendo empregado na realização de ensaios em diversos modelos de TPs. Este capítulo visa apresentar e comparar os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios de ferrorressonância conduzidos em cada amostra de TP.

Para validar o modelo de simulação proposto neste trabalho, inicialmente é apresentada uma curva que compara os resultados experimentais e de simulação da corrente RMS no enrolamento de baixa tensão do TP em relação à tensão aplicada. Os resultados de simulação, são apresentados em valores de pico com sua correspondente forma de onda, necessitando assim, realizar a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obtenção dos valores RMS. Já os valores experimentais foram diretamente medidos através do osciloscópio digital.

Além disso, são apresentados os resultados de simulação e ensaios de ferrorressonância em cada amostra de TP por meio de tabelas. Essas tabelas são estruturadas para indicar a ocorrência ou não de ferrorressonância nos cenários selecionados, destacando a eficácia do modelo de simulação como um indicativo do fenômeno.

Por fim, são fornecidos gráficos de simulação e oscilogramas reais de alguns cenários em que não houve ferrorressonância comparados a cenários onde foi identificado um indicativo positivo e a efetiva ocorrência do fenômeno oscilatório. Os oscilogramas de todos os casos em que ocorreram ferrorressonância encontram-se no Anexo A deste trabalho.

Essa abordagem completa busca oferecer uma visão abrangente e comparativa entre os resultados simulados e experimentais, enriquecendo a compreensão do fenômeno de ferrorressonância em cada amostra de TP ensaiada.

4.1 Validação do modelo

O modelo desenvolvido demonstrou resultados consistentes, para todas as amostras, em relação à variação da corrente RMS no enrolamento de baixa tensão do TP em resposta à tensão aplicada, os quais foram corroborados pelos testes práticos realizados em laboratório. Observou-se apenas um leve desvio entre os valores de medição e simulação na parte linear da curva corrente versus tensão, como indicado na Figura 41. Este fato exerce pouca influência no fenômeno investigado, uma vez que a ferrorressonância ocorre com o TP operando na região saturada da curva e a indicação de ocorrência ou não de ferrorressonância não é influenciada pela parte linear da curva.

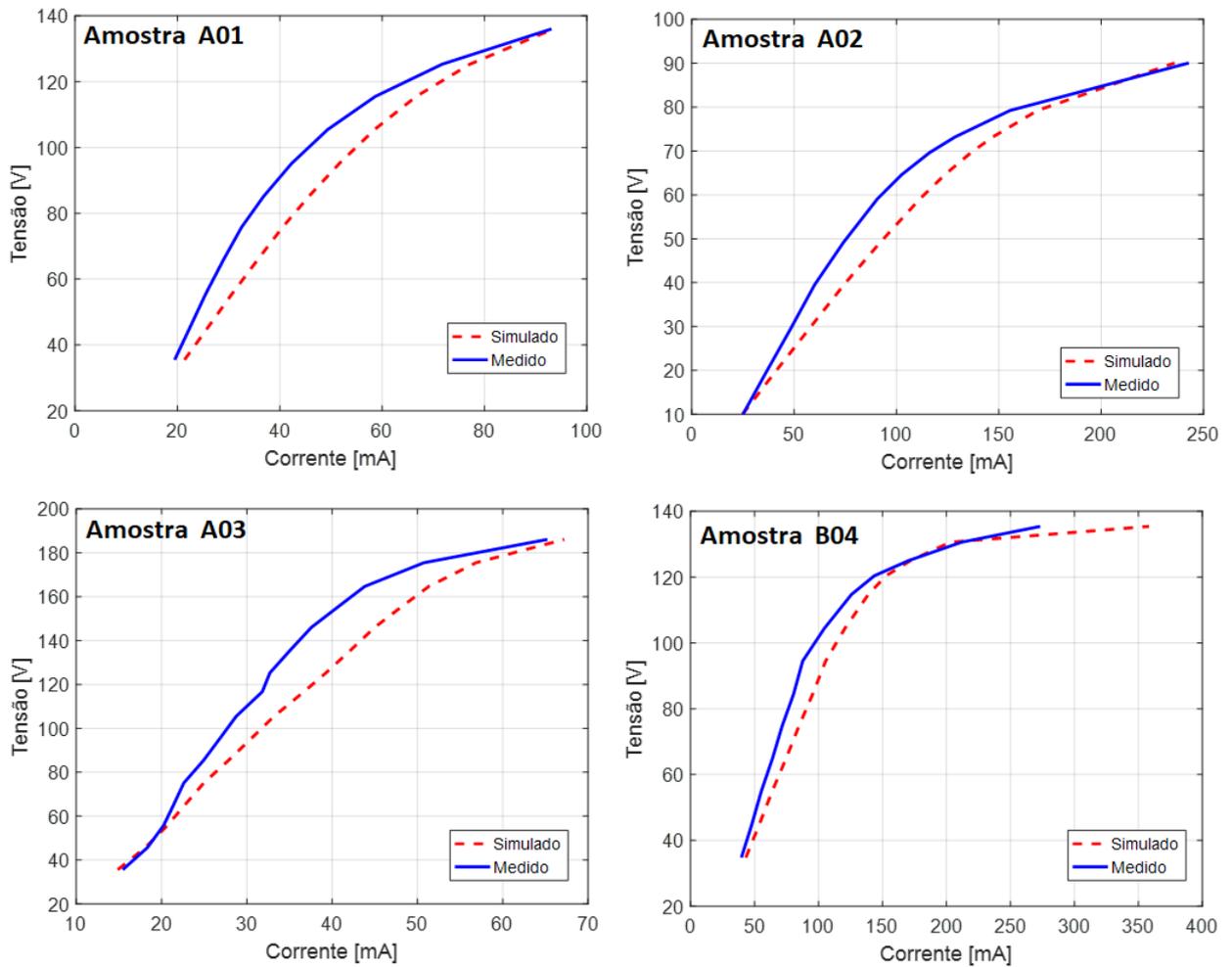


Figura 41 - Curvas da variação da corrente RMS em função da tensão aplicada.

4.2 Resultados de ferorrressonância

Neste subcapítulo, os resultados fundamentais oriundos das simulações computacionais e dos ensaios laboratoriais realizados em diversas amostras de transformadores de potencial (TPs) são explorados. As análises comparativas destacam o papel do modelo de simulação como um indicador do fenômeno e permitem a compreensão do comportamento desses equipamentos em cenários de ferorrressonância. Na tabela 6 são apresentados os resultados com uma concordância de 100% entre simulação e ensaio de ferorrressonância para a amostra A01, servindo como um ponto de partida crucial para as análises comparativas.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de ferrorressonância na amostra A01

Capacitâncias		Resultado		Capacitância		Resultado	
C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio	C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio
50	0	x	x	1410	0	●	●
50	50	x	x	1410	50	x	x
50	235	x	x	1410	235	x	x
50	705	x	x	1410	705	x	x
50	1410	x	x	1410	1410	▲	▲
50	2350	x	x	1410	2350	x	x
235	0	x	x	2350	0	x	x
235	50	x	x	2350	50	x	x
235	235	x	x	2350	235	x	x
235	705	x	x	2350	705	x	x
235	1410	x	x	2350	1410	●	●
235	2350	x	x	2350	2350	●	●
705	0	●	●	5 · 10 ⁶	0	x	x
705	50	●	●	5 · 10 ⁶	50	x	x
705	235	x	x	5 · 10 ⁶	235	x	x
705	705	x	x	5 · 10 ⁶	705	x	x
705	1410	x	x	5 · 10 ⁶	1410	x	x
705	2350	x	x	5 · 10 ⁶	2350	x	x

● ocorrência de ferrorressonância sustentada

▲ ocorrência de ferrorressonância não sustentada

x ausência de ferrorressonância

Os resultados obtidos revelaram que, para certas combinações de valores de capacitância *shunt* e de equalização, o circuito demonstrou um comportamento estável e normal, sem quaisquer sinais de ferrorressonância, conforme evidenciado nas Figuras 42 e 43. Nessas condições, o circuito permaneceu operando de forma estável, sem experimentar oscilações indesejadas ou elevações significativas na tensão.

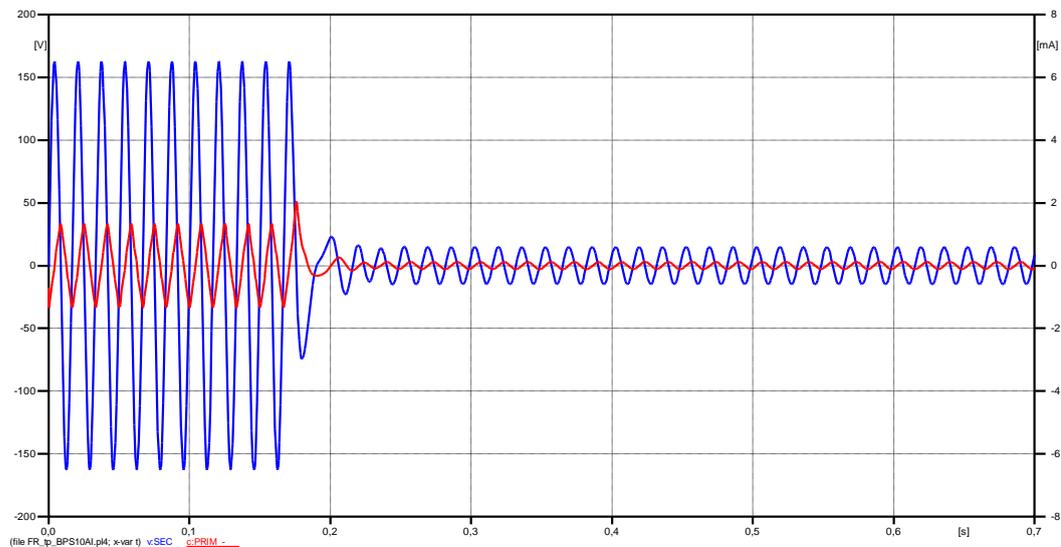


Figura 42 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 50 pF – 705 pF.

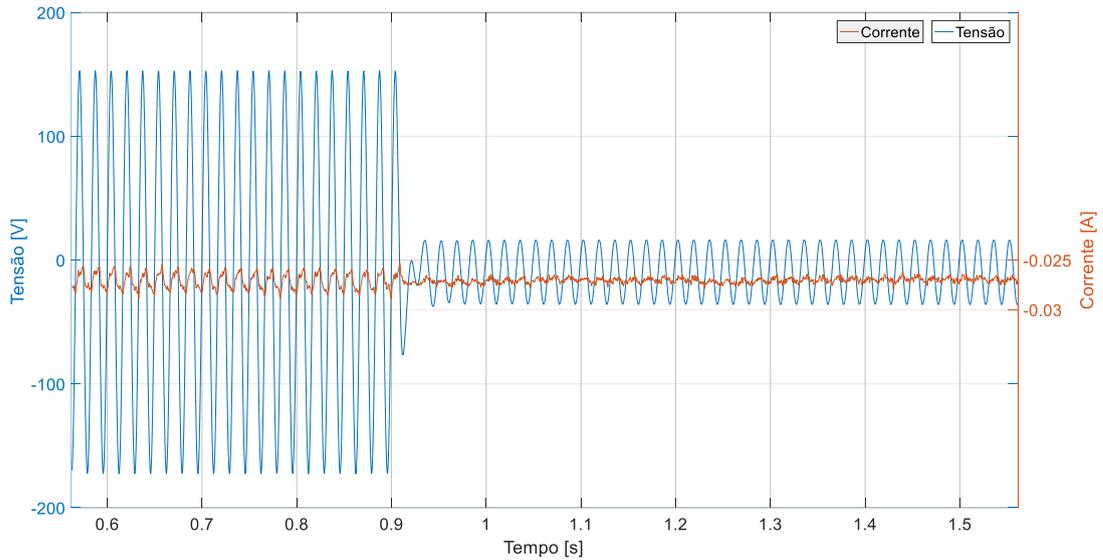


Figura 43 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 50 pF – 705 pF.

No entanto, para outras combinações de capacitâncias, observou-se um comportamento distinto. Nessas situações, o circuito entrou em estado de ferrorressonância, como mostrado nas Figuras 44 e 45. Esses cenários apresentaram oscilações pronunciadas na tensão e na corrente, além de picos de tensão que ultrapassaram os níveis esperados.

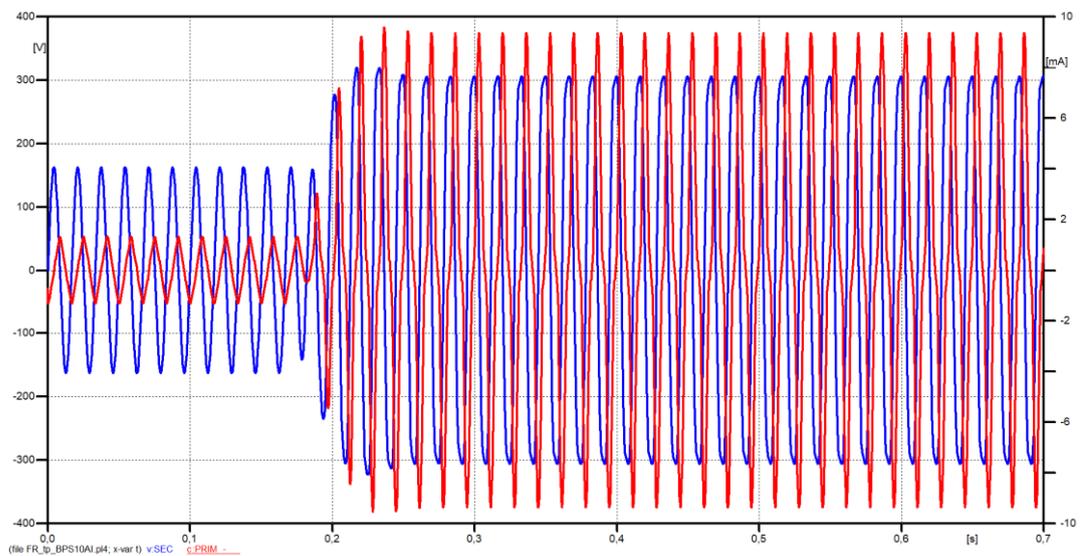


Figura 44 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.

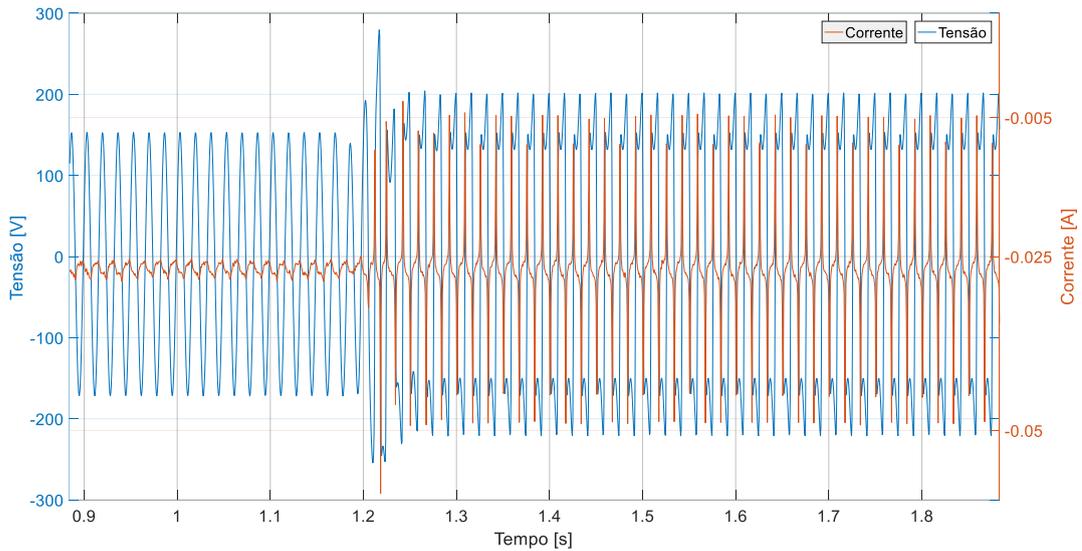


Figura 45 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.

Adicionalmente, tanto na simulação digital quanto nos testes em laboratório, foi detectada ferorrressonância não sustentada no cenário com capacitâncias de 1410 pF, conforme ilustrado nas Figuras 46 e 47. É importante ressaltar que esse tipo de oscilação ferorrressonante não resulta em danos imediatos aos TPs sujeitos a essa condição oscilatória.

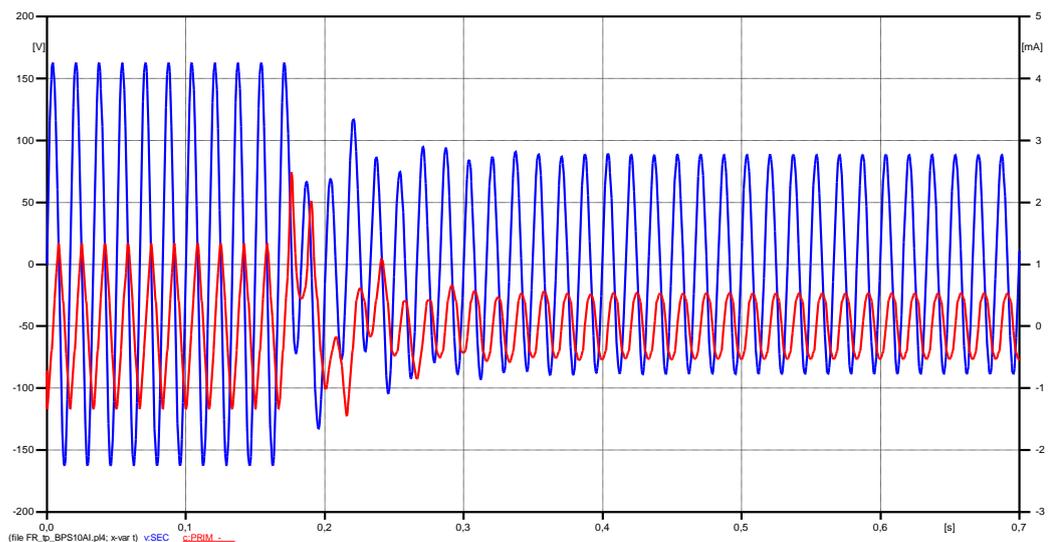


Figura 46 - Simulação FR na amostra A01, cenário de 1410 pF – 1410 pF.

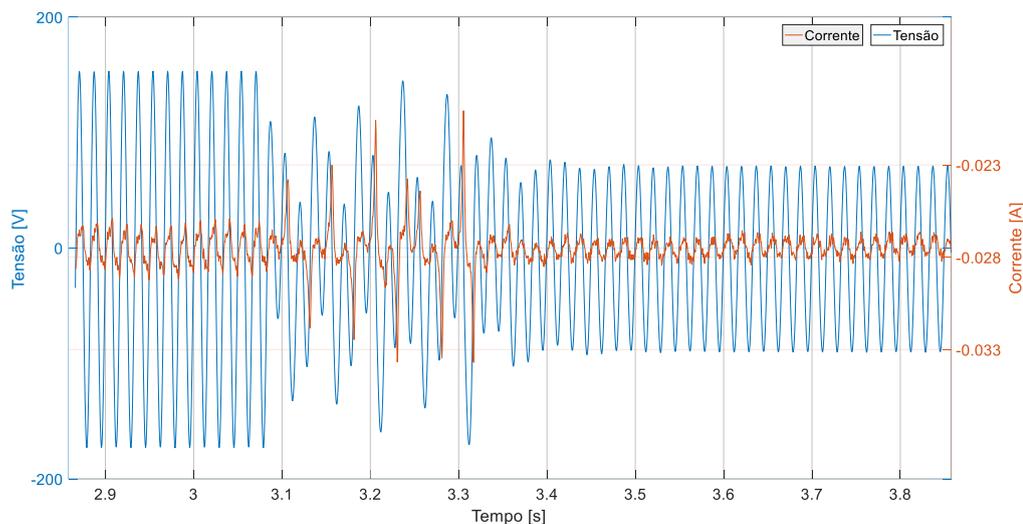


Figura 47 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 1410 pF -1410 pF.

Na tabela 7 tem-se uma concordância de 94,4% entre os resultados da simulação e do ensaio de ferorrressonância para a amostra A02. Essa taxa de coerência substancial ainda indica uma boa correlação entre os resultados obtidos nos dois métodos de análise.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de ferorrressonância na amostra A02

Capacitâncias		Resultado		Capacitâncias		Resultado	
C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio	C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio
50	0	x	x	1410	0	●	●
50	50	x	x	1410	50	●	x
50	235	x	x	1410	235	x	x
50	705	x	x	1410	705	x	x
50	1410	x	x	1410	1410	x	x
50	2350	x	x	1410	2350	x	x
235	0	x	x	2350	0	x	x
235	50	x	x	2350	50	x	x
235	235	x	x	2350	235	x	x
235	705	x	x	2350	705	x	x
235	1410	x	x	2350	1410	x	x
235	2350	x	x	2350	2350	x	x
705	0	●	●	5 · 10 ⁶	0	x	x
705	50	●	x	5 · 10 ⁶	50	x	x
705	235	x	x	5 · 10 ⁶	235	x	x
705	705	x	x	5 · 10 ⁶	705	x	x
705	1410	x	x	5 · 10 ⁶	1410	x	x
705	2350	x	x	5 · 10 ⁶	2350	x	x

● ocorrência de ferorrressonância

x ausência de ferorrressonância

Os resultados obtidos mais uma vez confirmaram que, para determinadas combinações de valores de capacitância *shunt* e de equalização, o circuito exibiu um comportamento estável e normal, conforme evidenciado nas figuras 48 e 49. No entanto, para outras combinações,

conforme ilustrado nas Figuras 50 e 51, foi observado um comportamento de ferorrressonância.

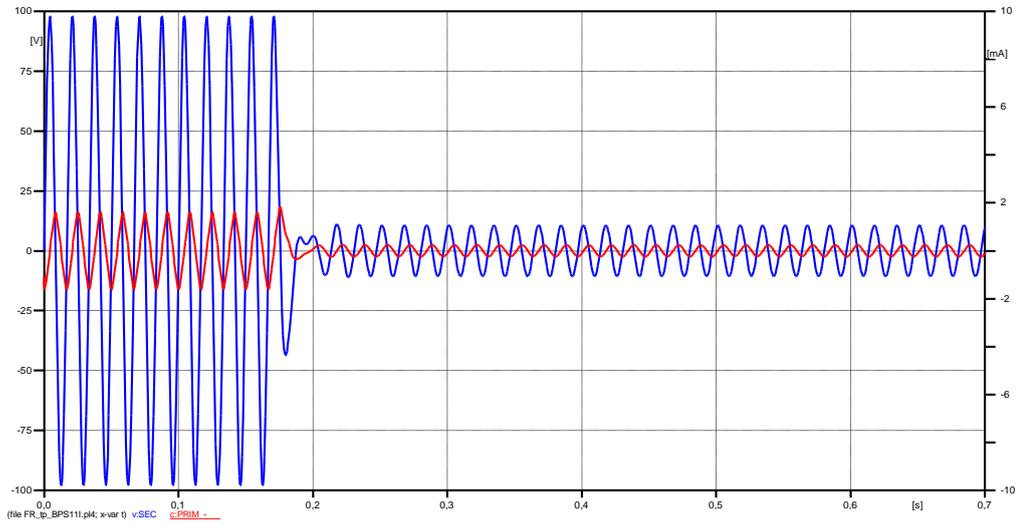


Figura 48 - Simulação FR na amostra A02, cenário de 50 pF – 705 pF.

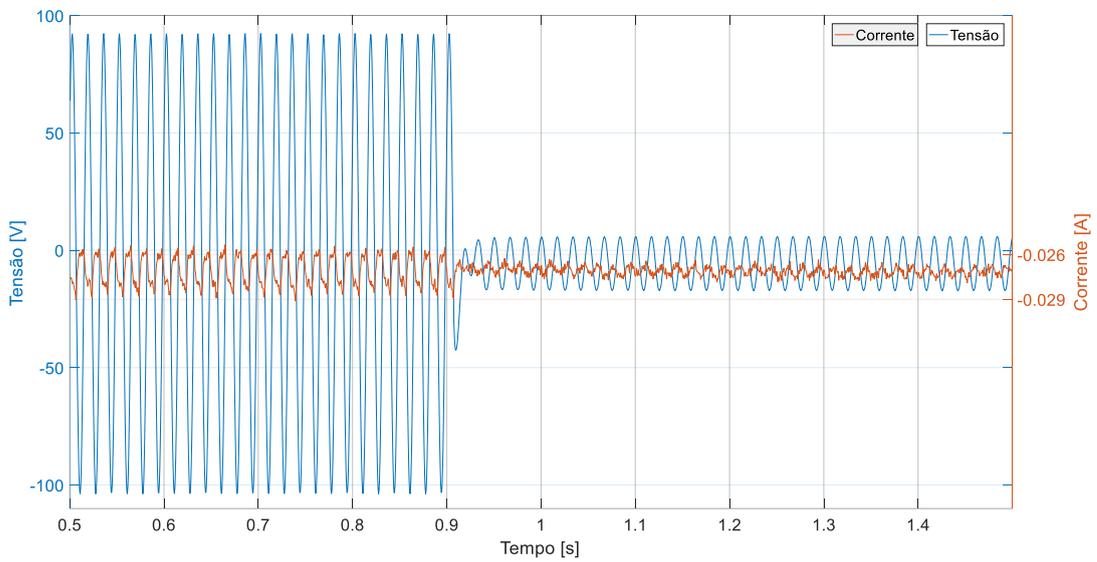


Figura 49 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 50 pF – 705 pF.

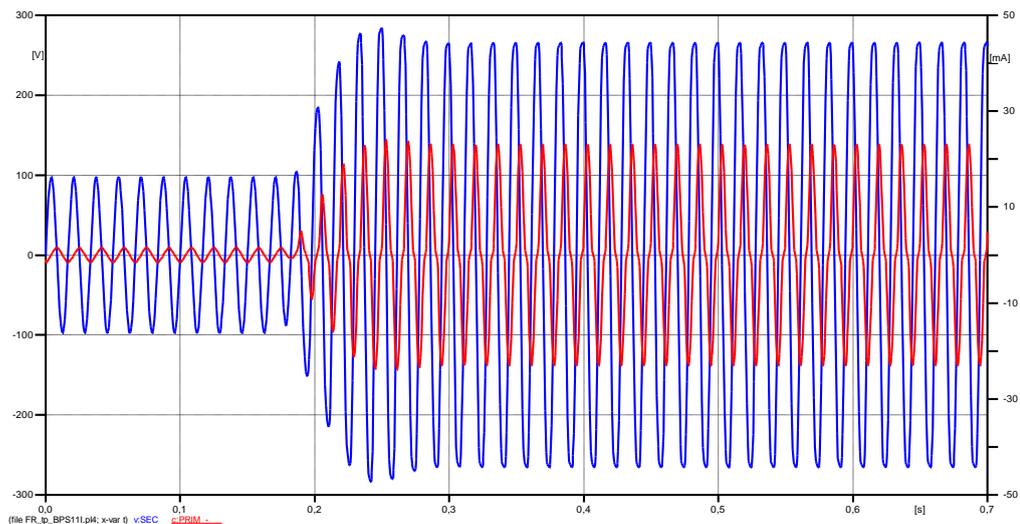


Figura 50 - Simulação FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.

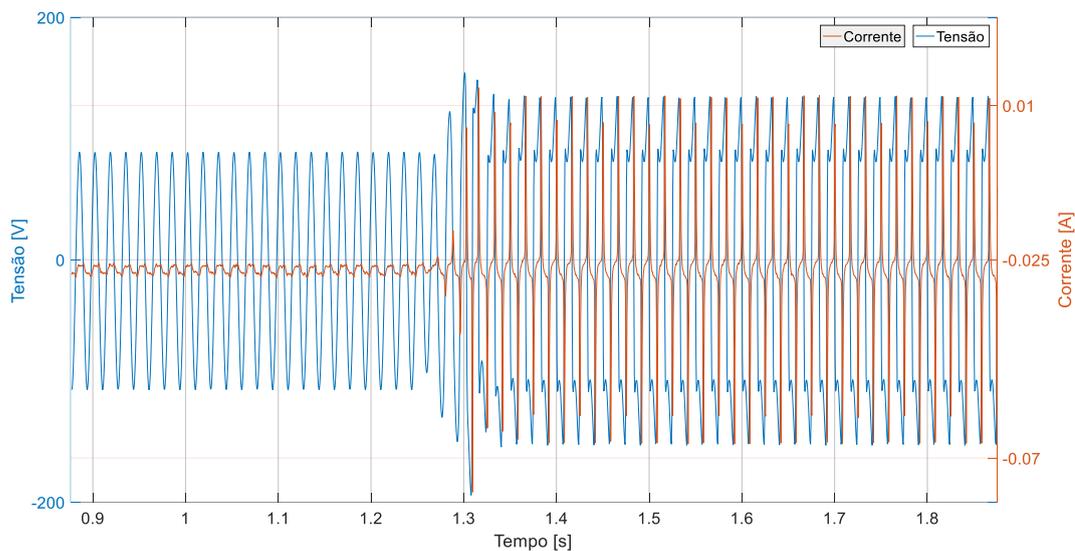


Figura 51 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.

Através da análise da corrente no estado ferorrressonante, como mostrado nas Figuras 52 e 53, é possível determinar se tratar de uma ferorrressonância de modo fundamental. Nesse modo, o espectro do sinal é caracterizado por uma série de componentes de frequência discretos, que incluem a frequência fundamental do sistema de potência e seus harmônicos.

Além disso, ao comparar as formas de onda obtidas por meio da simulação com os oscilogramas registrados durante o ensaio, observa-se uma clara similaridade nos resultados.

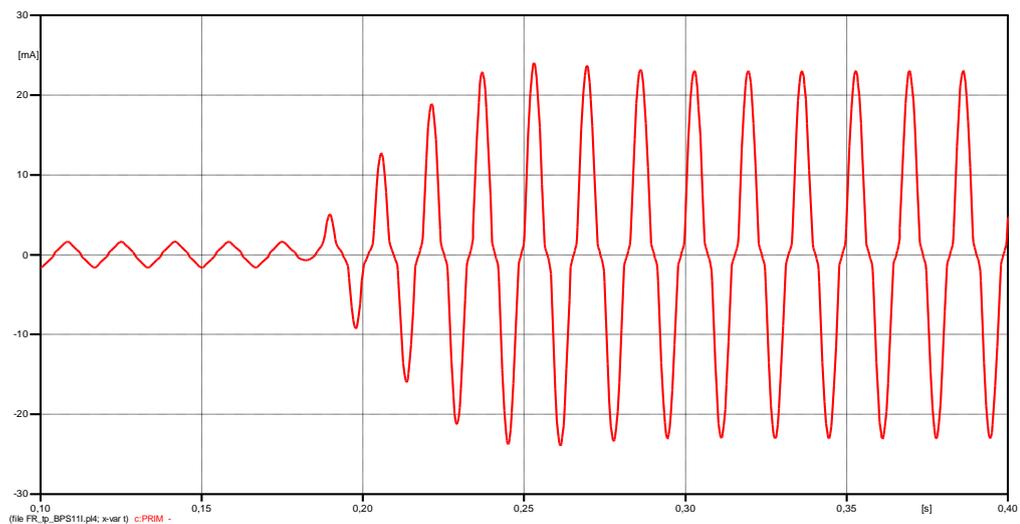


Figura 52 - Simulação da corrente na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.

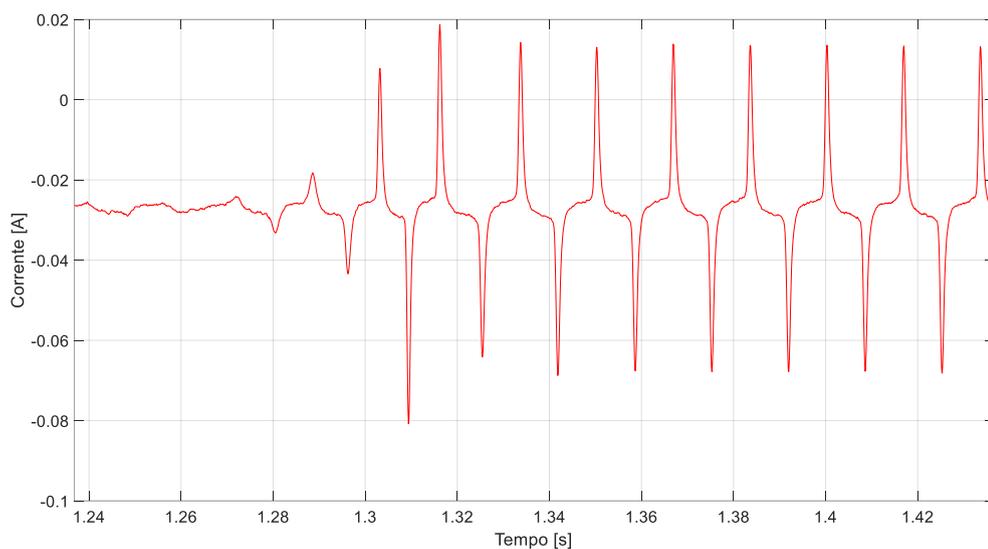


Figura 53 - Oscilograma da corrente na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.

Na tabelas 8 tem-se uma concordância de 100% para a ocorrência do fenômeno e 94,4% de concordância no quesito ferrorressonância sustentada ou não-sustentada entre os resultados da simulação e do ensaio de ferrorressonância para a amostra A03.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de ferrorressonância na amostra A03

Capacitâncias		Resultado		Capacitâncias		Resultado	
C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio	C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio
50	0	x	x	1410	0	x	x
50	50	x	x	1410	50	x	x
50	235	x	x	1410	235	x	x
50	705	x	x	1410	705	▲	●
50	1410	x	x	1410	1410	●	●
50	2350	x	x	1410	2350	●	●
235	0	x	x	2350	0	x	x
235	50	x	x	2350	50	x	x
235	235	x	x	2350	235	x	x
235	705	x	x	2350	705	x	x
235	1410	x	x	2350	1410	▲	●
235	2350	x	x	2350	2350	●	●
705	0	x	x	5 · 10 ⁶	0	x	x
705	50	x	x	5 · 10 ⁶	50	x	x
705	235	x	x	5 · 10 ⁶	235	x	x
705	705	x	x	5 · 10 ⁶	705	x	x
705	1410	x	x	5 · 10 ⁶	1410	x	x
705	2350	x	x	5 · 10 ⁶	2350	x	x

- ocorrência de ferrorressonância sustentada
- ▲ ocorrência de ferrorressonância não-sustentada
- x ausência de ferrorressonância

Os resultados obtidos confirmam a ausência de ferrorressonância para alguns cenários, como mostrado nas Figuras 54 e 55, enquanto demonstram sua presença em outros.

É importante ressaltar que o modo ferrorressonante observado para o cenário de 1410 pF – 2350 pF, destacado nas Figuras 56 e 57, difere dos modos ferrorressonantes observados nas amostras anteriores. Esse fato destaca a variedade do fenômeno investigado.

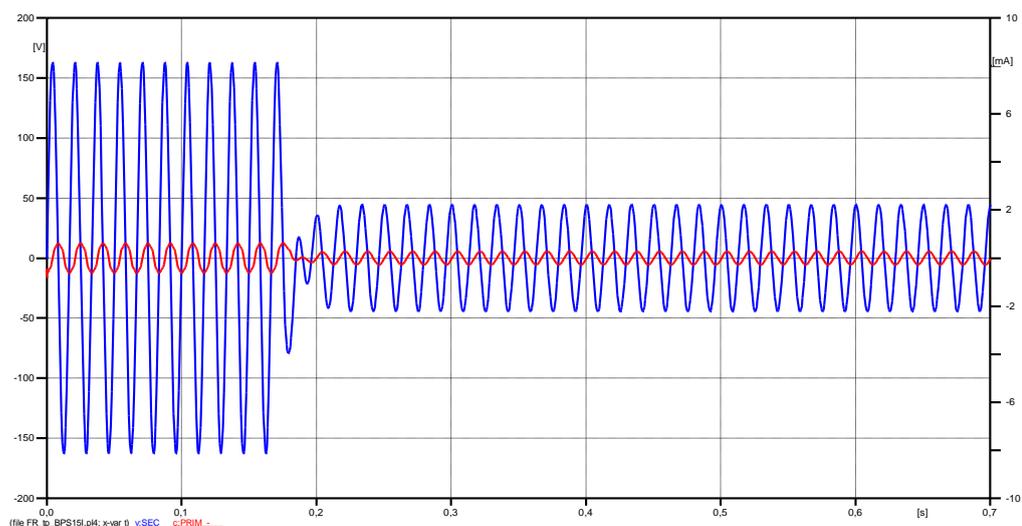


Figura 54 - Simulação FR na amostra A03, cenário de 50 pF – 235 pF.

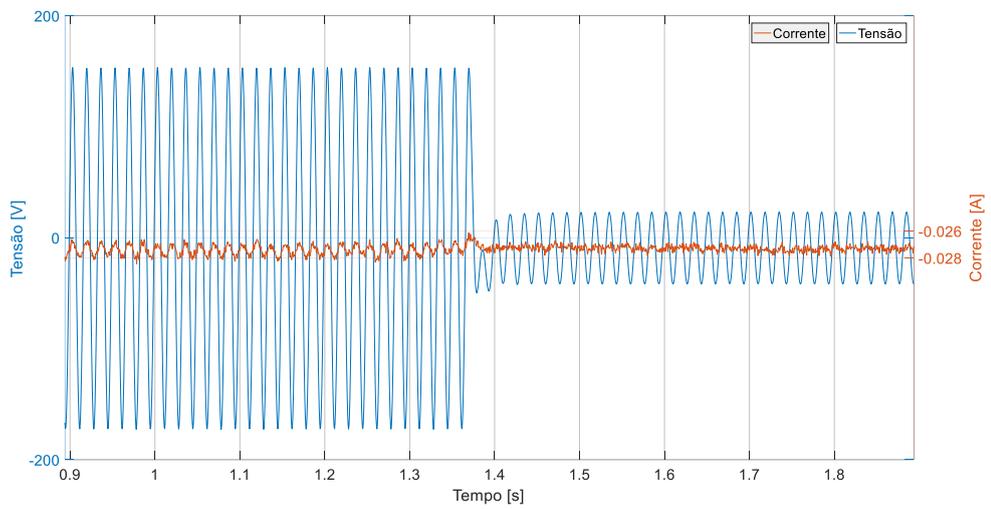


Figura 55 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 50 pF – 235 pF.

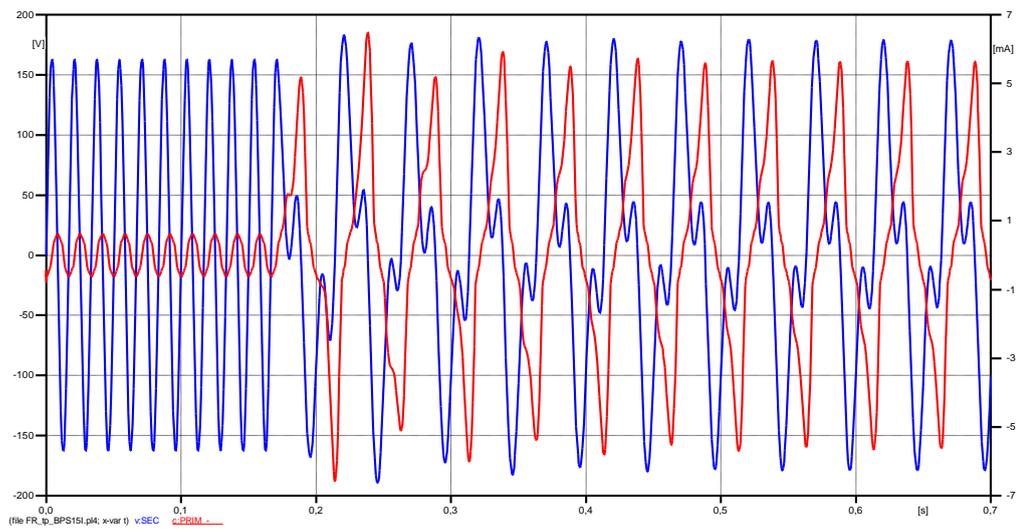


Figura 56 - Simulação FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.

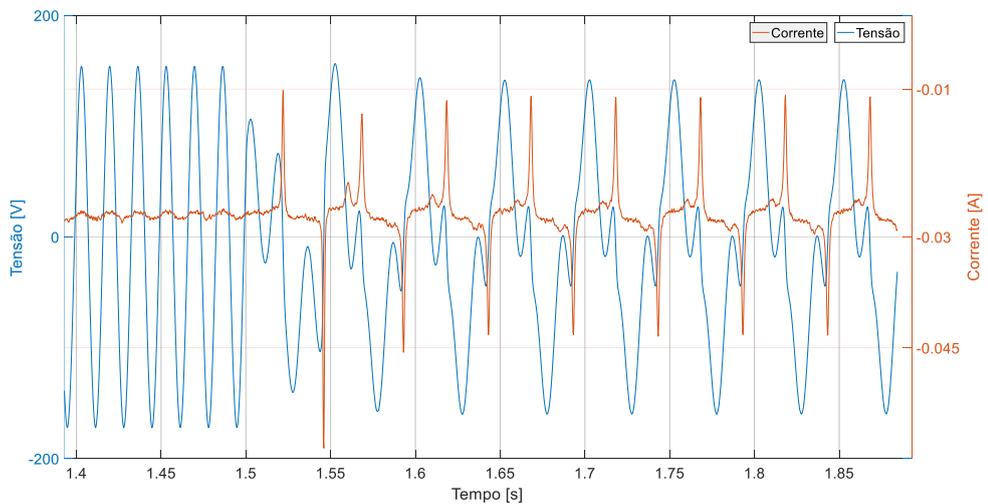


Figura 57 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.

Na tabelas 9 tem-se uma concordância de 97,2% entre os resultados da simulação e do ensaio de ferrorressonância para a amostra B04. Essa alta taxa de coerência indica uma correspondência significativa entre os resultados obtidos nos dois métodos de análise.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de ferrorressonância na amostra B04

Capacitâncias		Resultado		Capacitâncias		Resultado	
C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio	C _S (pF)	C _B (pF)	Simulação	Ensaio
50	0	x	x	1410	0	●	●
50	50	x	x	1410	50	●	●
50	235	x	x	1410	235	●	●
50	705	x	x	1410	705	x	x
50	1410	x	x	1410	1410	x	x
50	2350	x	x	1410	2350	x	x
235	0	x	x	2350	0	●	●
235	50	x	x	2350	50	●	●
235	235	x	x	2350	235	●	●
235	705	x	x	2350	705	x	x
235	1410	x	x	2350	1410	x	x
235	2350	x	x	2350	2350	x	x
705	0	●	●	5 · 10 ⁶	0	x	x
705	50	●	●	5 · 10 ⁶	50	x	x
705	235	●	x	5 · 10 ⁶	235	x	x
705	705	x	x	5 · 10 ⁶	705	x	x
705	1410	x	x	5 · 10 ⁶	1410	x	x
705	2350	x	x	5 · 10 ⁶	2350	x	x

● ocorrência de ferrorressonância

x ausência de ferrorressonância

Os resultados obtidos reiteram a ausência de ferrorressonância em alguns cenários, enquanto revelam sua presença em outros. É fundamental ressaltar que a amostra B04, assim como as demais amostras exibiu cenários de ferrorressonância em combinações distintas, destacando mais uma vez a singularidade de cada amostra diante desse fenômeno.

Além disso, é importante destacar que em vários cenários que não foram identificados como ferrorressonantes, ocorreram picos de corrente durante o chaveamento. Este fenômeno foi observado em todas as amostras e não foi categorizado como ferrorressonância, pois não se sustenta por mais de meio ciclo, não representando um risco para o transformador de potencial. No entanto, é notável a capacidade do modelo em detectar esse fenômeno, como ilustrado nas Figuras 58 e 59, mais uma vez demonstrando sua eficácia.

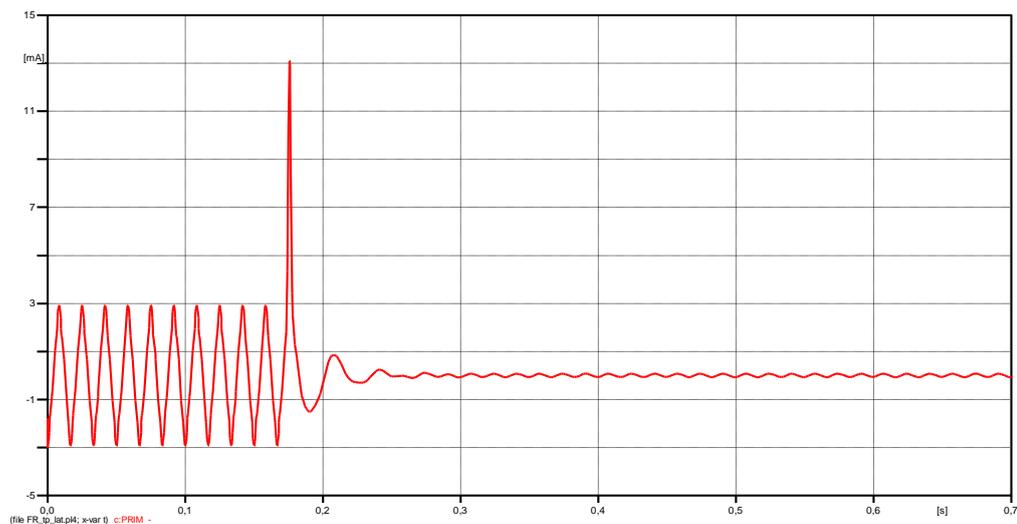


Figura 58 - Simulação FR na amostra B01, cenário de 50 pF – 2350 pF.

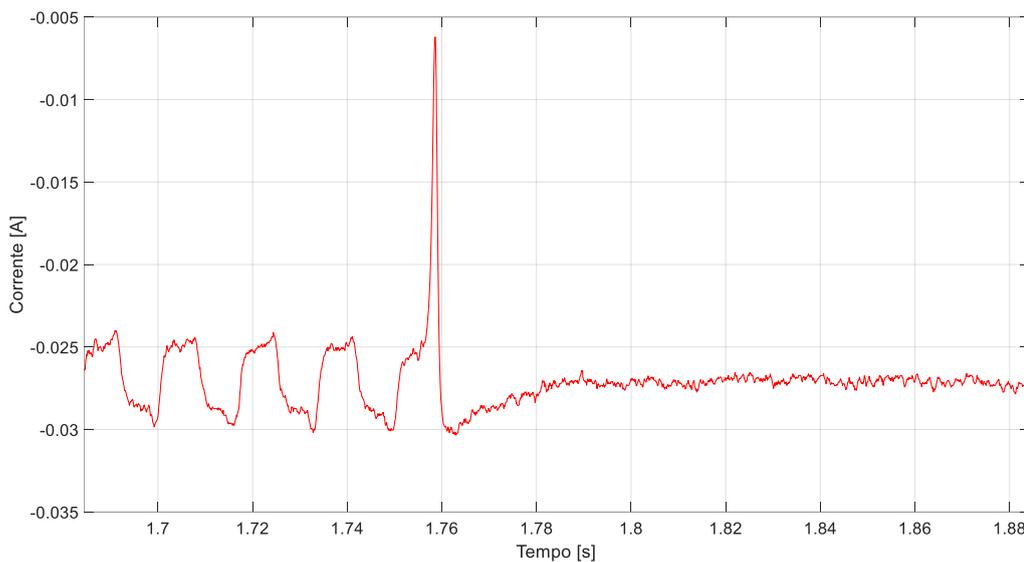


Figura 59 - Oscilograma de FR na amostra B01, cenário de 50 pF – 2350 pF.

Por fim, conforme previsto para a amostra A05, que se caracteriza por ser um dispositivo com apenas características capacitivas, nenhuma oscilação ferrorressonante foi observada em nenhum dos cenários estudados. Esse resultado reafirma a necessidade da combinação de uma indutância não linear de núcleo saturável e capacitâncias para a geração do fenômeno de ferrorressonância. Além disso, os resultados indicam que este dispositivo se mostra como uma alternativa viável de transformador de potencial em relação aos efeitos indesejados da ferrorressonância.

As Figuras 60 e 61 ilustram, respectivamente, a simulação e o oscilograma do ensaio de ferrorressonância para a amostra A05, no cenário em que foram empregados 50 pF de

capacitância série e 705 pF de capacitância *shunt*.

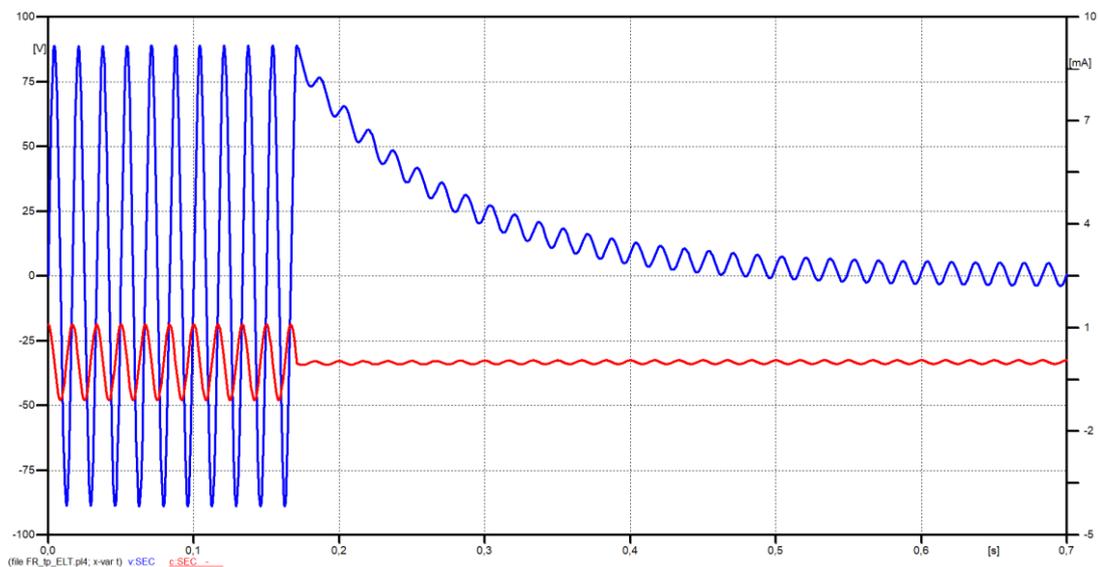


Figura 60 - Simulação FR na amostra A05, cenário de 50 pF – 705 pF.

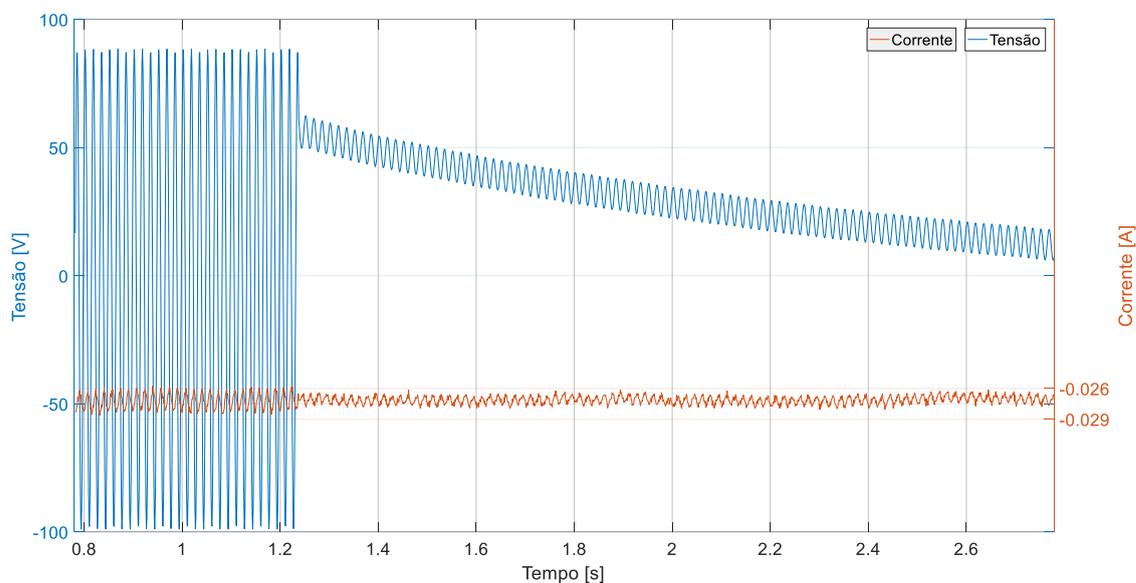


Figura 61 - Oscilograma de FR na amostra A05, cenário de 50 pF – 705 pF.

4.3 Análise dos resultados

Os oscilogramas obtidos, em concordância com os resultados teóricos, validam a eficácia do sistema de testes desenvolvido na geração e detecção do fenômeno de ferromressonância. Isso viabiliza a análise e comparação de diversos transformadores de potencial sob a influência desse fenômeno em condições simuladas em laboratório, refletindo

fielmente as operações reais do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Acredita-se que a divergência entre a indicação positiva para ferrorressonância e sua não confirmação nos ensaios para alguns casos mencionados acima pode ser atribuída à influência dos sistemas de medição, ausência de capacitâncias e indutâncias parasitas nos modelos desenvolvidos e à modelagem do elemento resistivo responsável por representar as perdas no núcleo do TP. Como o elemento resistivo é modelado com um valor constante, ele não sofre variações ao longo do processo de simulação. A justificativa para essa possível hipótese reside no fato de que, ao modificar manualmente o valor dessa resistência no modelo de simulação, os resultados indicativos da ocorrência ou não de ferrorressonância também se alteram. Essa inconsistência ressalta a importância de uma modelagem mais precisa e dinâmica dos componentes do sistema, especialmente quando se trata de fenômenos não lineares como a ferrorressonância.

Ainda assim, os resultados obtidos demonstraram que, embora a forma de onda simulada não corresponda exatamente à forma de onda medida nos testes, sua aparência geral é muito próxima, refletindo fielmente o comportamento do caso real na maioria das vezes. Dessa forma, pode-se afirmar que o modelo EMTP desenvolvido neste estudo tem a capacidade de prever, de forma qualitativa, os possíveis modos de ferrorressonância, desde que os parâmetros do sistema sejam conhecidos ou possam ser estimados.

5 Considerações finais

5.1 Conclusões

Com o desenvolvimento do modelo EMTP e do sistema de testes em laboratório, esta pesquisa possibilitou uma investigação aprofundada sobre o fenômeno da ferroressonância, em transformadores de potencial, iniciada por comutação de disjuntores com capacitância de equalização. Exploraram-se diversas perspectivas relacionadas à sua ocorrência, destacando a sensibilidade à variáveis específicas, como as capacitâncias presentes no sistema, fornecendo ferramentas para prever e detectar o fenômeno.

Importante ressaltar que o sistema desenvolvido não se limita exclusivamente a ferroressonância iniciada por meio da comutação de disjuntores com capacitância de equalização, ele é versátil o suficiente para representar diversos cenários de sistemas monofásicos com acoplamento de tensão através de capacitância em série com o equipamento testado. Essa flexibilidade proporciona uma abordagem abrangente para a análise e compreensão do fenômeno em diferentes contextos, fornecendo ao LAT-EFEI as ferramentas necessárias para a realização de futuros estudos e ensaios.

Os resultados deste estudo não apenas destacam a importância da abordagem metodológica que combina simulações computacionais e ensaios práticos em laboratório, mas também oferecem recomendações para aprimorar a confiabilidade e o desempenho dos transformadores de potencial. Por exemplo, ao identificar os valores críticos que desencadeiam a ocorrência de ferroressonância para cada transformador testado, fornecemos diretrizes úteis para a configuração e operação desses equipamentos.

Assim, os fabricantes e outros setores da indústria elétrica podem se beneficiar diretamente deste estudo, utilizando as informações fornecidas para otimizar o projeto, a instalação e a operação de transformadores de potencial. Além disso, os resultados deste estudo contribuem para garantir a confiabilidade e a estabilidade dos sistemas elétricos de potência, promovendo uma infraestrutura mais segura e eficiente para o fornecimento de energia elétrica.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para aprimorar o modelo de simulação desenvolvido, há diversas oportunidades de melhorias e expansões. Uma delas consiste no desenvolvimento de um modelo de elemento resistivo não linear, visando representar de maneira mais precisa as perdas no núcleo do

transformador. Adicionalmente, explorar a utilização de outros elementos indutivos não lineares pode ser uma abordagem valiosa para lidar com as possíveis disparidades entre as simulações e os resultados dos testes em laboratório. Isso não apenas pode proporcionar uma análise mais abrangente e precisa, mas também oferecer a oportunidade de comparar diferentes modelos e abordagens.

Em relação aos testes práticos, há várias oportunidades de aprimoramento a serem consideradas. Uma delas é o desenvolvimento de um dispositivo dedicado ao controle do instante de comutação, o que poderia proporcionar uma maior precisão e controle sobre os experimentos realizados. Além disso, seria vantajoso incorporar ao sistema um medidor capaz de fornecer valores reais da capacitância presente no circuito, o que contribuiria para uma caracterização mais detalhada e precisa do ambiente de teste.

Adicionalmente, seria oportuno explorar testes envolvendo outros cenários específicos, visando abranger uma gama mais ampla de condições operacionais e possíveis cenários de ferrorressonância. Esses testes poderiam incluir estudos de mitigação de ferrorressonância, como o desenvolvimento e avaliação de estratégias para minimizar os efeitos adversos desse fenômeno nos transformadores de potencial.

Por fim, a expansão do ensaio para um sistema trifásico poderia fornecer uma compreensão mais abrangente e representativa do comportamento dos transformadores de potencial em situações mais complexas e realistas. Essas melhorias e expansões potenciais podem contribuir significativamente para o avanço do conhecimento e da compreensão do fenômeno de ferrorressonância em transformadores de potencial.

Referências

- [1] M. d. C. Camargo, *Metodologia para modelagem de transformadores de potencial indutivo e capacitivo para estudos de transitórios em altas frequências*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- [2] H. S. Bronzeado, Z. Emin, L. Kocis e E. B. Shim, “Review of ferroresonance phenomenon on power systems: practical examples and experience with adopted solutions,” em *Cigre International Symposium*, Recife, Brasil, 2011.
- [3] L. D. C. d. Medeiros, *Simulação de modelos de núcleos magnéticos para estudos de correntes de inrush e ferroressonância*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- [4] V. Valverde, A. J. Mazón, I. Zamora e G. Buigues, “Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations,” em *Int. Conference Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, Sevilla, 2007.
- [5] D. A. N. Jacobson, “Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 2, 2003.
- [6] R. S. da Silva, R. C. dos Santos e A. P. G. Pavani, “Aplicação de redes neurais artificiais para detecção de ferroressonância em transformadores de potencial indutivo,” em *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2020.
- [7] R. Rogersten e R. Eriksson, “A Ferroresonance Case Study Involving a Series-Compensated Line in Sweden,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Perpignan, France, 2019 [19ipst091].
- [8] L. B. Viena, F. A. Moreira, N. R. Ferreira e N. C. d. Jesus, “A Comparative Analysis of Transformer Models Available in the ATP Program for the Simulation of Ferroresonance,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Delft, Netherlands, 2011 [11ipst113].
- [9] E. Martínez, G. Antonova e M. Olguín, “Ferroresonance Phenomenon in CFE, its Origin and Effects,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Vancouver, Canada, 2013 [13ipst100].
- [10] M. V. Escudero, I. Dudurych e M. A. Redfern, “Characterization of Ferroresonant Modes in HV Substation with CB Grading Capacitors,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Montreal, Canada, 2005 [05ipst146].
- [11] S. Santoso, R. C. Dugan, T. E. Grebe e P. Nedwick, “Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, 2001 [01IPST042].
- [12] ABNT IEC/TR 61869-102, *Transformadores para instrumento Parte 102: Oscilações de ferroressonância em subestações com transformadores de potencial indutivos*, 2022.
- [13] K. Gauthier e M. Alawie, “A Special Case of Ferroresonance Involving a Series Compensated Line,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Seoul, South Korea, 2017 [17ipst038].
- [14] E. Godoy e E. Martinez, “Recording and ATP Simulation of Ferroresonance Phenomenon in an SVC of Mexican Electrical System,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, 2015 [15ipst096].
- [15] U. Karaagac, J. Mahseredjian e L. Cai, “Ferroresonance Conditions in Wind Parks,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, 2015 [15ipst166].
- [16] S. I. Kim, B. C. Sung, S. N. Kim, Y. C. Choi e H. J. Kim, “A Study on Ferroresonance Mitigation Techniques for Power Transformer,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, 2015 [15ipst192].
- [17] K. Pattanapakdee e C. Banmongkol, “Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service

- Trasformer Ferroresonance,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Lyon, France, 2007 [07ipst081].
- [18] W. Piasecki, M. Stosur, T. Kuczek, M. Kuniewski e R. Javora, “Ferroresonance in MV Voltage Transformers: Pragmatic experimental approach towards investigation of risk and mitigating strategy,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Seoul, South Korea, 2017 [17ipst130].
- [19] J. A. C. Araujo, F. G. Molina, J. A. M. Velasco, J. A. B. Rodrigo e L. G. Pesquer, “An EMTP-based analysis of the switching shift angle effect during energization/de-energization in the final ferroresonance state,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Vancouver, Canada, 2013 [13ipst019].
- [20] Z. Emin e Y. K. Tong, “Ferroresonance Experience in UK: Simulations and Measurements,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Rio de Janeiro, Brasil, 2001 [01ipst044].
- [21] M. Sanaye-Pasand e R. Aghazadeh, “Capacitive Voltage Substations Ferroresonance Prevention Using Power Eletronic Devices,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, New Orleans, USA, 2003 [03IPST09c-02].
- [22] E. Price, “A Tutorial on Ferroresonance,” em *67th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, IEEE. p. 676-704, 2014.
- [23] A. I. Shirkovets, A. Y. Vasilyeva, A. A. Bazavluk e A. V. Telegin, “Investigation and Simulation of Ground Faults and Group Ferroresonance in 6 kV Industrial Cable Network with Involvement of Results of Trasients Digital Recording,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Seoul, Republic of Korea, 2017 [17ipst178].
- [24] Z. Emin, B. A. T. A. Zahawi, D. W. Auckland e Y. K. Tong, “Ferroresonance in electrpmagnetic voltage transformers: A study based on nonlinear dynamics,” em *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v. 144, n. 4, p. 383-387, 1997.
- [25] A. Heidary, K. Rouzbehi, H. Radmanesh e J. Pou, “Voltage Transformer Ferroresonance: An Inhibitor Device,” em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 6, p. 2731-2733, 2020.
- [26] A. H. A. Bakar, S. A. Khan, T. C. Kwang e N. A. Rahim, “A Review of Ferroresonance in Capacitive Voltage Transformer,” em *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, v. 10, n. 1, p. 28-35, 2015.
- [27] P. Sakarung e S. Chatratana, “Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Montreal, Canada, 2005 [05ipst227].
- [28] W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, P. Mahonen e W. Nowak, “Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks,” em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2362-2369, 2007.
- [29] F. B. Ajaei, M. S. Pasand, A. R. Zare e R. Iravani, “Analysis and Suppression of the Coupling Capacitor Voltage Transformer Ferroresonance Phenomenon,” em *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 4, p. 1968-1977, 2009.
- [30] C. Charalambous, Z. D. Wang, J. Li, M. Osborne e P. Jarman, “Validation of a Power Transformer Model for Ferroresonance with System Tests on a 400 kV Circuit,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Lyon, France, 2007 [07ipst016].
- [31] D. Krajtner e I. Ziger, “Influence of HV inductive voltage transformers core design to the ferroresonance occurrence probability,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, 2015 [15ipst071].
- [32] A. R. Zare e R. Iravani, “Impacts of Various Representations of Core Saturation Curve on Ferroresonance Behavior of Transformers,” em *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Kyoto, Japan, 2009 [09ipst066].
- [33] A. N. 6855, *Transformador de potencial indutivo com isolação sólida para tensão máxima igual ou inferior a 52 kV - Especificação e ensaios*, 2021.
- [34] Can/Am EMTP User Group. "ATP Rule Book," 1992.

ANEXO A – Oscilogramas de ferorrressonância

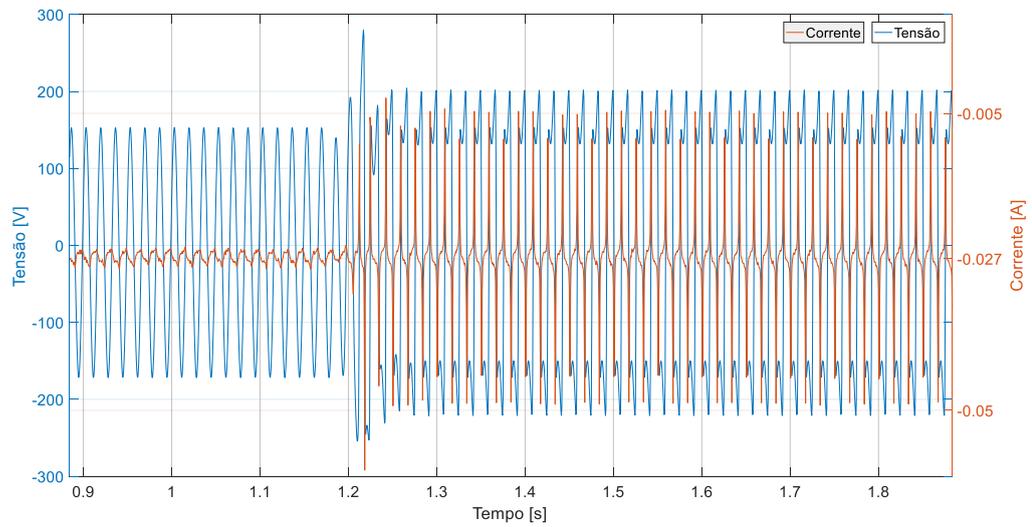


Figura 62 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 0 pF.

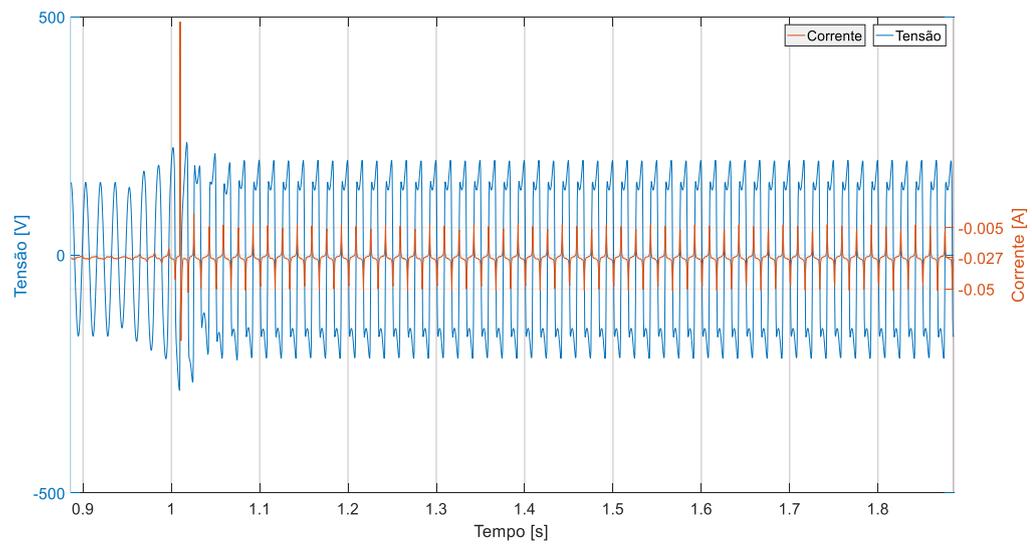


Figura 63 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 705 pF – 50 pF.

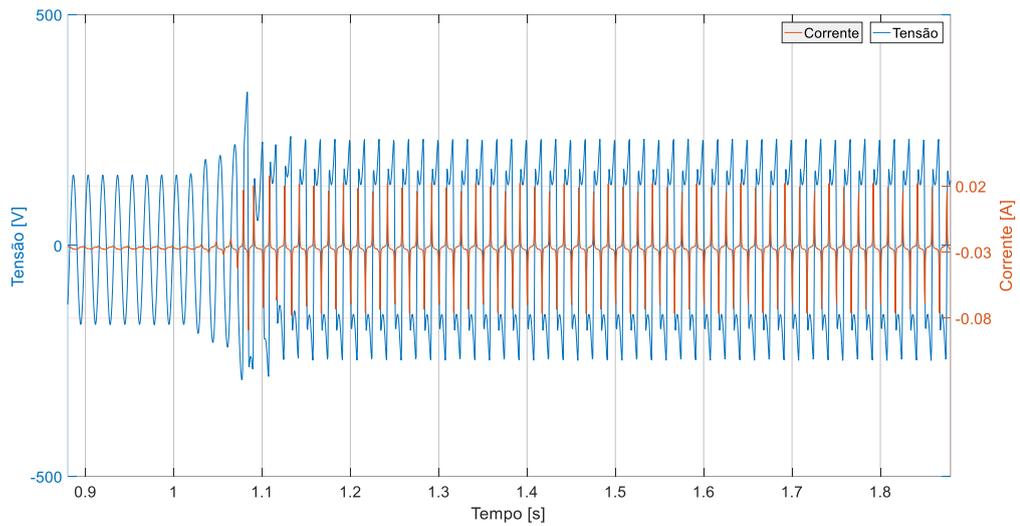


Figura 64 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 1410 pF – 0 pF.

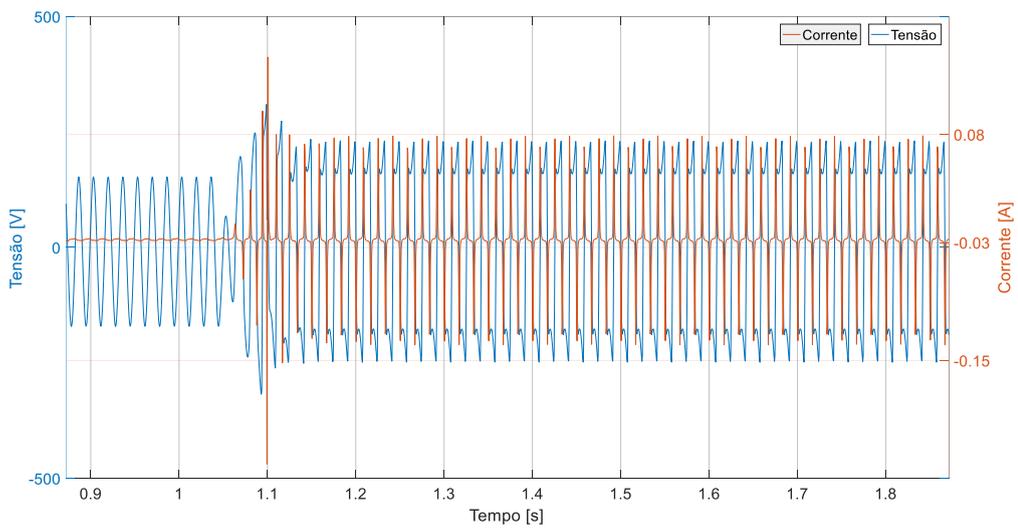


Figura 65 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 2350 pF – 1410 pF.

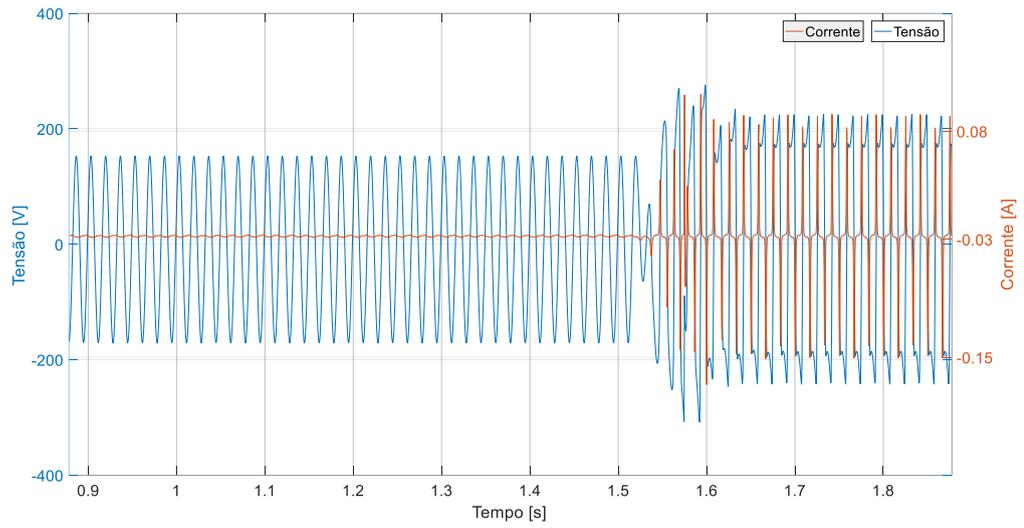


Figura 66 - Oscilograma de FR na amostra A01, cenário de 2350 pF – 2350 pF.

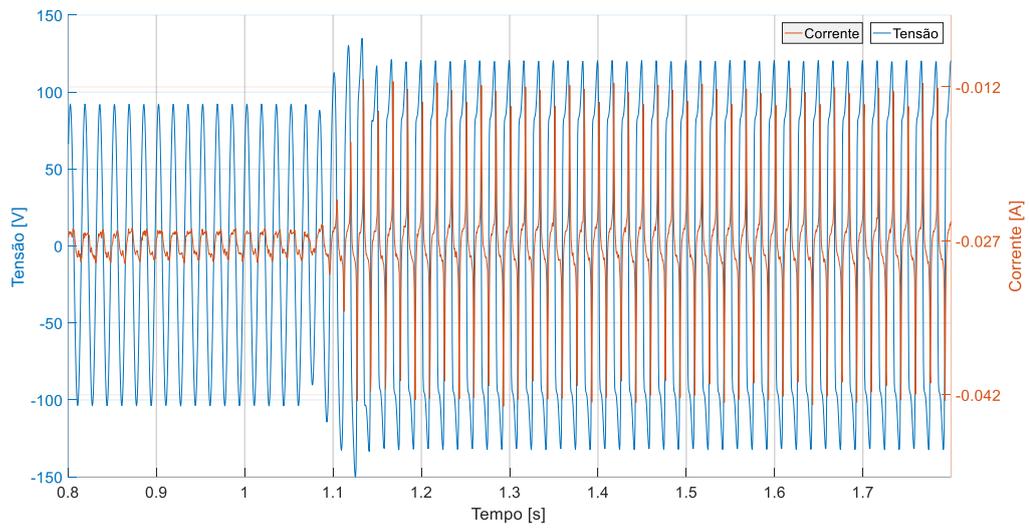


Figura 67 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 705 pF – 0 pF.

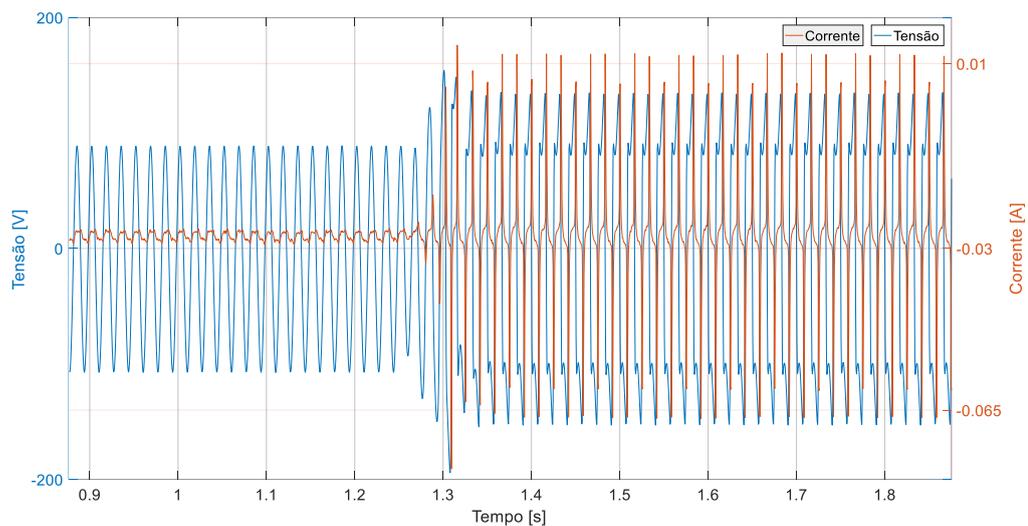


Figura 68 - Oscilograma de FR na amostra A02, cenário de 1410 pF – 0 pF.

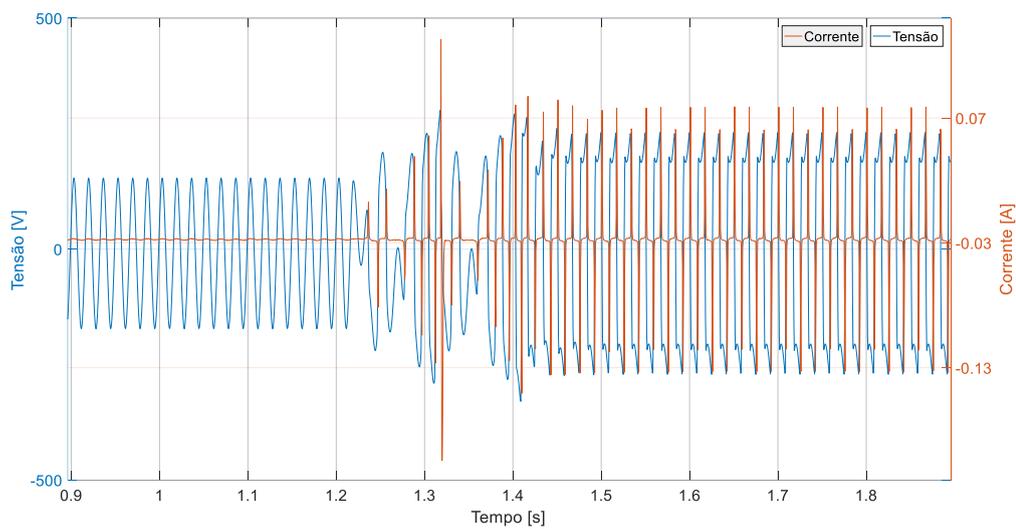


Figura 69 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 1410 pF.

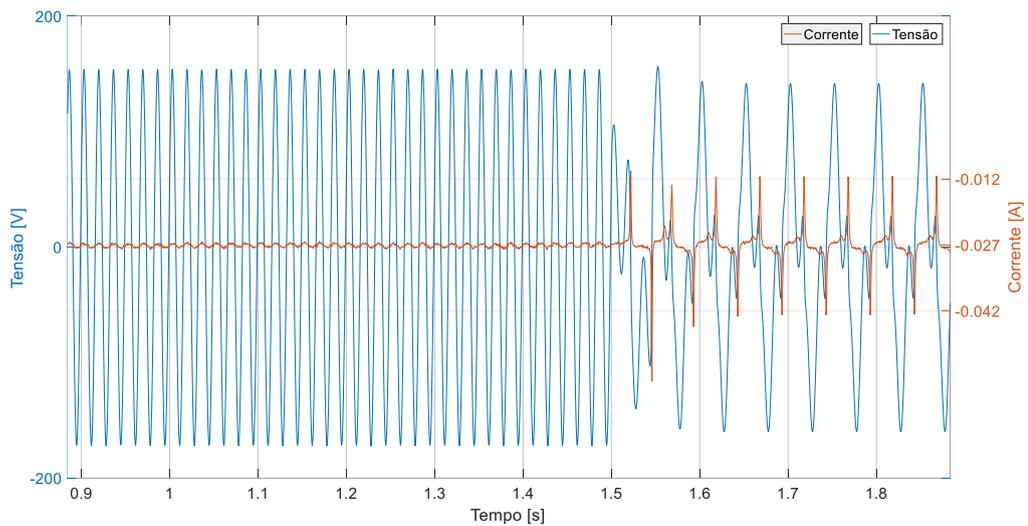


Figura 70 - Oscilograma de FR na amostra A03, cenário de 1410 pF – 2350 pF.

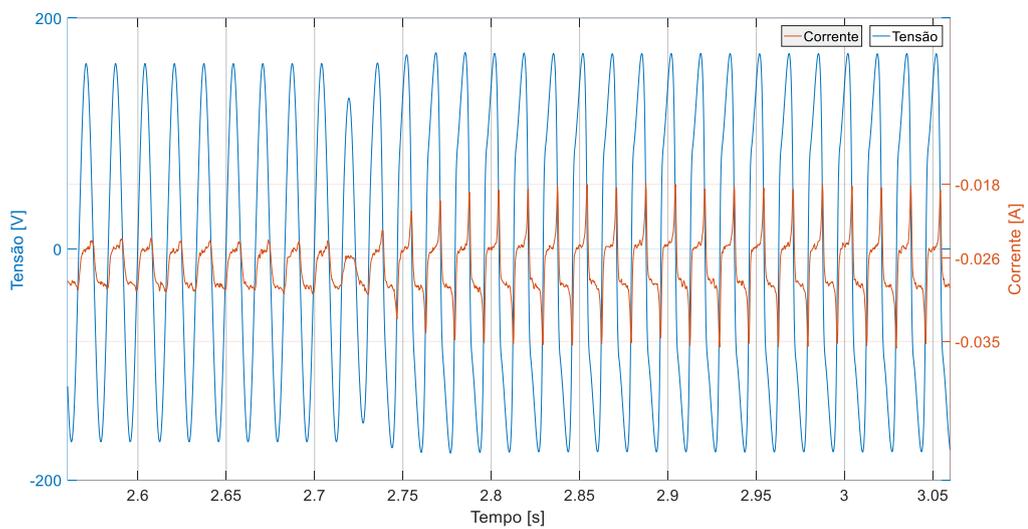


Figura 71 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 705 pF – 0 pF.

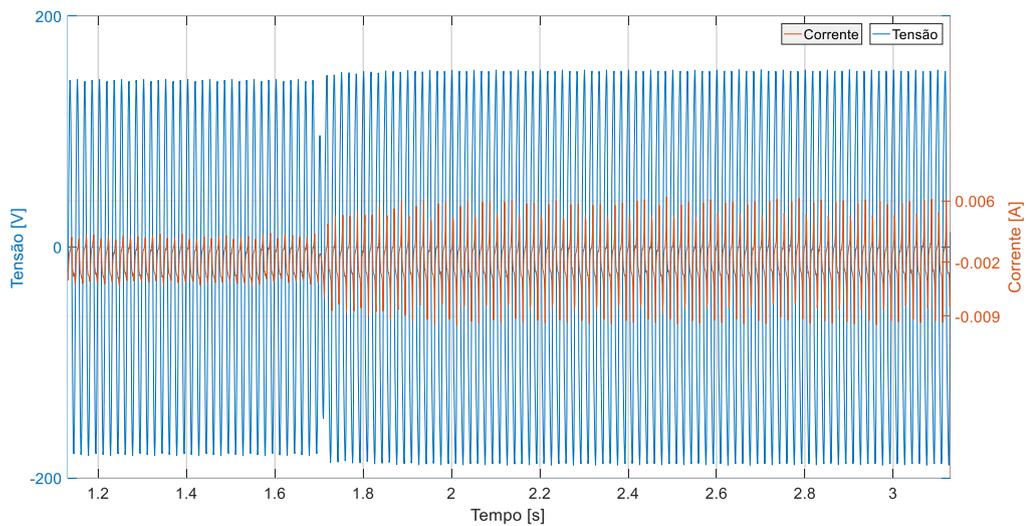


Figura 72 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 705 pF – 50 pF.

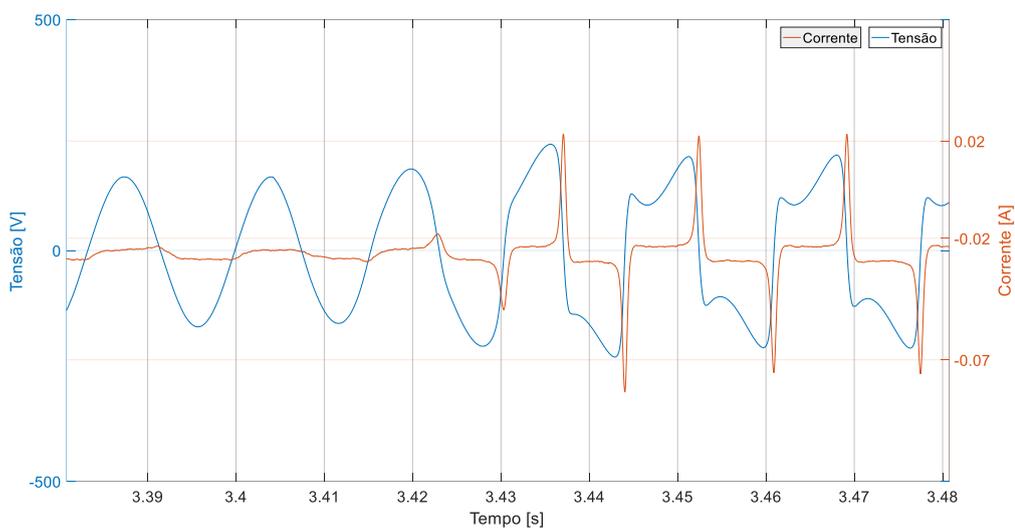


Figura 73 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 0 pF.

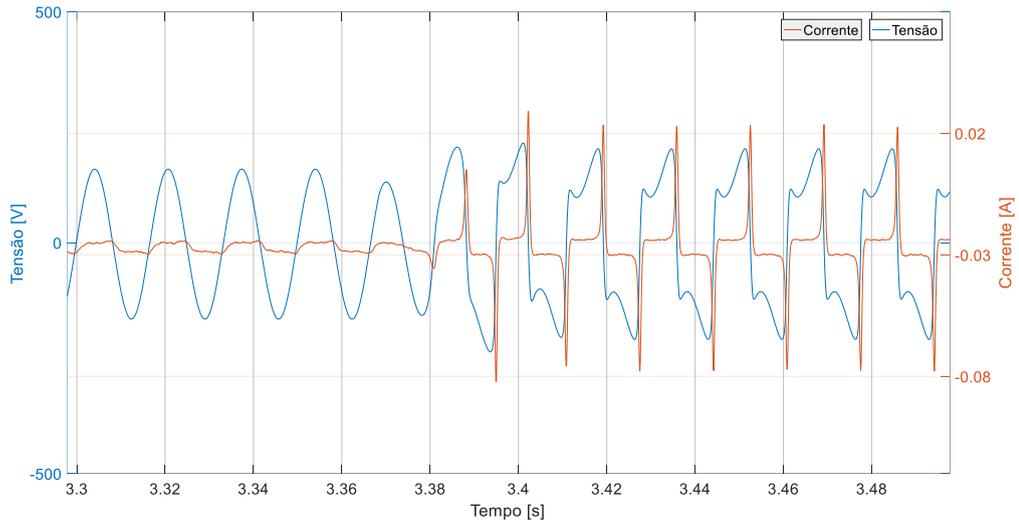


Figura 74 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 50 pF.

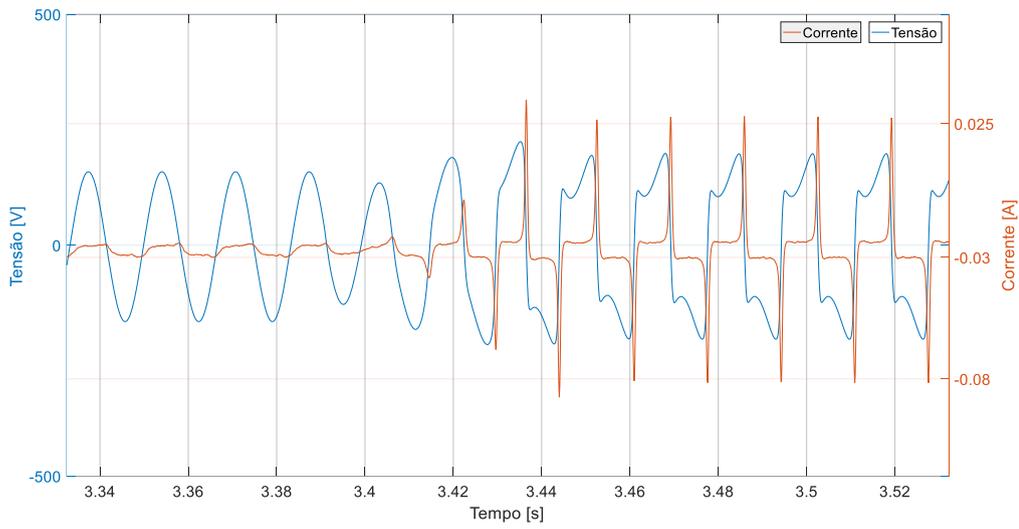


Figura 75 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 1410 pF – 235 pF.

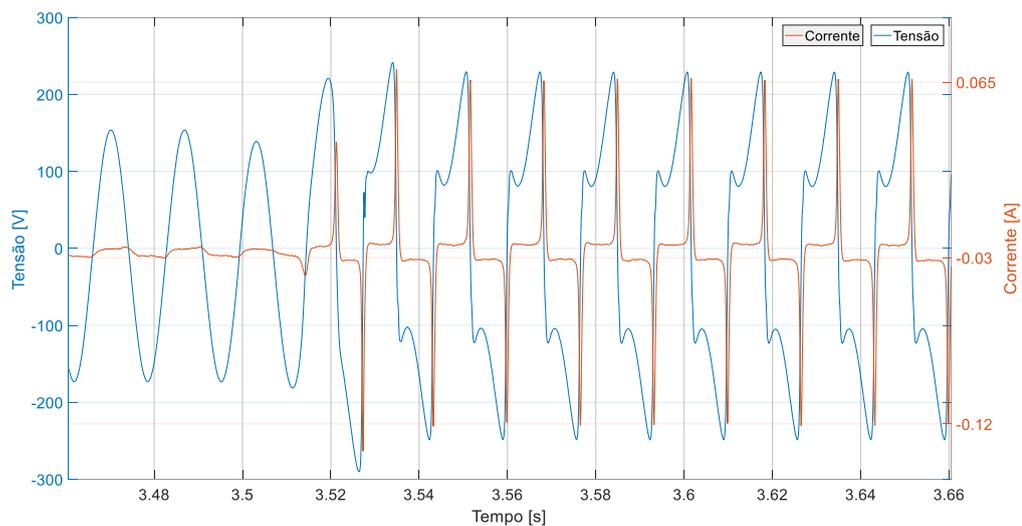


Figura 76 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 0 pF.

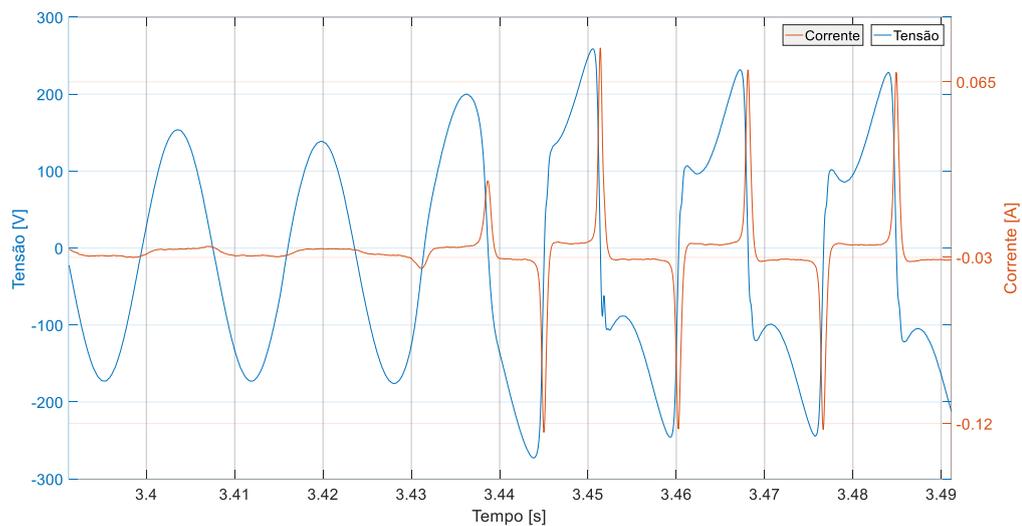


Figura 77 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 50 pF.

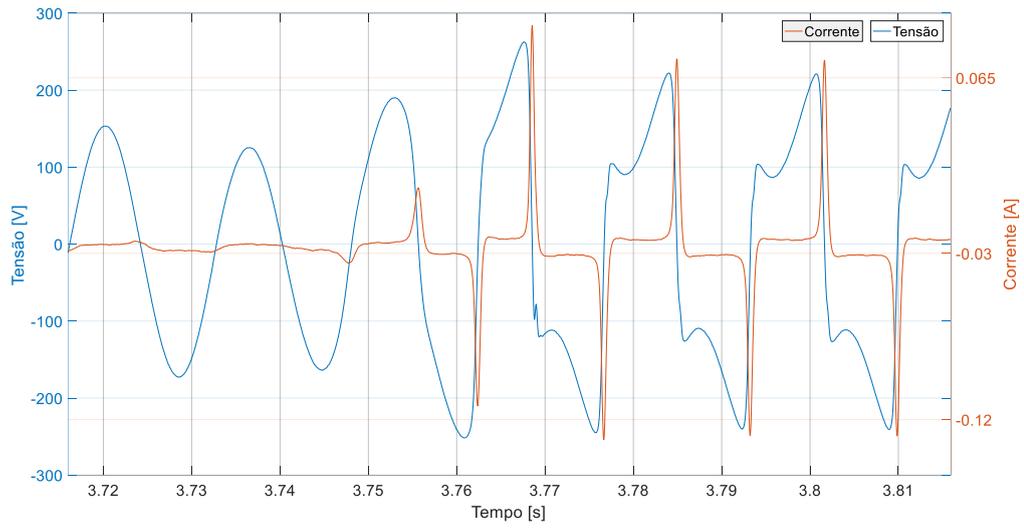


Figura 78 - Oscilograma de FR na amostra B04, cenário de 2350 pF – 235 pF.