



UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Vital Pereira Batista Junior

**Análise de Efeitos de Indução Eletromagnética em Transformadores
Planos e Anelares**

Juazeiro-Ba

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO

CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Vital Pereira Batista Junior

**Análise de Efeitos de Indução Eletromagnética em Transformadores
Planos e Anelares**

Trabalho apresentado a Universidade Federal do Vale do São Francisco- Univasf, campus Juazeiro, Como requisito da obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduard Montgomery Meira Costa.

Juazeiro-Ba

2012

Espaço para Ficha catalográfica

UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO

CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Vital Pereira Batista Junior

**Análise de Efeitos de Indução Eletromagnética em Transformadores
Planos e Anelares**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Eduard Montgomery Meira Costa, DSc UNIVASF

Nome, titulação e instituição

Nome, titulação e instituição

Aprovado pelo Colegiado de Eng. Elétrica em ____/____/2012.

DEDICATÓRIA

Ao Meu Pai(*In memoriam*)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida e de todos meus familiares.

Em especial ao meu pai que não está mais presente, mas que é sem dúvida meu grande herói.

A minha mãe que sempre fez tudo por mim.

A minha avó que sempre cuidou de mim.

A minha namorada Quelle pelo apoio.

A minha tia Ivanildes, Tio Paixão e tio Arnóbio.

Aos meus irmãos Wellington, Wilson, Vital Filho, Eric e em especial a Alisson, Adriana e Adrielly.

Ao meu orientador professor Eduard pela coragem e força em enfrentar os problemas de frente.

A todos os professores do colegiado de Engenharia Elétrica que me orientaram por todos esses anos.

Aos meus amigos de infância: Milton, João Diego, Valdemir, Josione, Romeu, Diego Guirra, Lucas Guirra, Ronilton, Anderson Amorim, Anderson Arnaldo, Paulo Frank, Diego Galvão, César Augusto, Henrique Levi.

Aos amigos da UNIVASF Cleiton, Diogo, Plínio, Lucas Pires, Rafael Pereira, Alan, Alexandre, Marlon Marques, Eduardo, Thiago Fernandes, Caio, Silas, João Guilherme, Rodrigo Abreu, Guilherme, Germeson, Paulo Júnior, Igaro, Eric Ishibashi, Marlon Jones, Edivaldo, Thiago Luiz, Gabriel, Inácio, James, Tércio, Tarso, Tércio, Carlos Henrique, Manu, Maurício, Isaac, Douglas.

O homem é como uma função, cujo numerador é o que ele é e cujo denominador é o que ele pensa dele mesmo.

I.N.Tolstoy

RESUMO

Esse trabalho consiste de estudos a respeito do efeito eletromotriz induzido em transformadores construídos com bobinas planas onde se excitou o primário a fim de analisar a resposta no secundário. As excitações foram feitas com ondas quadradas e senoidais, onde houve variação de frequência com a finalidade de obter a resposta do transformador na sua frequência de ressonância.

Essa atividade também contou com uma análise matemática do sistema através da função de transferência do circuito equivalente do transformador de bobinas planas. O MATLAB foi a ferramenta computacional usada para obter respostas no domínio da frequência desse modelo proposto.

Esse estudo tenta a possibilidade de conseguir a transmissão de energia sem fio com o uso desse transformador de bobinas planas.

Palavras chaves: Frequência, bobinas, transformadores, ressonância.

ABSTRACT

This work consists of studies on the effect induced electromotive transformers built with flat coils where the primary is excited to analyze the response in the secondary. The excitation was made with square wave and sinusoidal, where there was variation of frequency in order to obtain the response of the transformer at its resonant frequency.

This activity also included a mathematical analysis of the system through the transfer function of the equivalent circuit of the transformer coils flat. The MATLAB software tool was used to obtain responses in the frequency domain this model.

This study attempts to achieve the possibility of transmitting power wirelessly using this planar transformer coils.

Keywords: Frequency, coils, transformers, resonance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Bobina do primário isolado do secundário.....	18
Figura 1.2- Circuito ligado via transformador.....	19
Figura 1.3- Diagrama de bloco de uma função de transferência(fonte: [8]).....	21
Figura 2.1- Transformador de bobinas planas ensaiado no laboratório.....	25
Figura 2.2- Transformador tendo o primário em anel e o secundário em disco.....	26
Figura 2.3- Primeira consideração do circuito equivalente do transformador.....	27
Figura 2.4- Segunda consideração do circuito equivalente do transformador.....	28
Figura 2.5- Terceira consideração do circuito equivalente do transformador.....	28
Figura 2.6- Quarta consideração do circuito equivalente do transformador.....	28
Figura 3.1- Terceira configuração do circuito equivalente.....	30
Figura 3.2- Circuito equivalente no domínio da frequência.....	31
Figura 3.3- Circuito equivalente reduzido.....	32
Figura 3.4- Simplificação do circuito equivalente.....	32
Figura 3.5- Circuito simplificado.....	33
Figura 3.6- Quarta configuração do circuito equivalente.....	34
Figura 3.7- Quarta configuração do circuito equivalente no domínio da frequência.....	34
Figura 3.8- Circuito equivalente com a capacitância parasita em paralelo com bobina L2.....	35
Figura 3.9- Circuito simplificado usado para encontrar a função de transferência...36	

Figura 4.1- Configuração analisada.....	40
Figura 4.2- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	41
Figura 4.3- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	42
Figura 4.4- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	41
Figura 4.5- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	42
Figura 4.6- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	43
Figura 4.7- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	43
Figura 4.8- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.....	45
Figura 4.9- Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	46
Figura 4.10- Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	46
Figura 4.11- Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	47
Figura 4.12- Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	47
Figura 4.13- Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	48

Figura 4.14- Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	48
Figura 4.15- Comparação entre cada curva para diferentes números de bobina.....	49
Figura 4.16- Esquema do circuito equivalente analisado.....	50
Figura 4.17- Circuito equivalente para essa configuração.....	51
Figura 4.18- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	52
Figura 4.19- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	52
Figura 4.20- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	53
Figura 4.21- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 20 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	53
Figura 4.22- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	54
Figura 4.23- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	54
Figura 4.24- Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.....	55
Figura 4.25- Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	56
Figura 4.26- Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	56
Figura 4.27- Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	57

Figura 4.28 -Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	57
Figura 4.29 -Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	58
Figura 4.30 - Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	58
Figura 4.31 -Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.....	59
Figura 4.32 -Comparação entre cada curva para diferentes números de espiras.....	59
Figura 4.33 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	61
Figura 4.34 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	61
Figura 4.35 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	62
Figura 4.36 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	62
Figura 4.37 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	63
Figura 4.38 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	63
Figura 4.39 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.....	64
Figura 4.40 -Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	65

Figura 4.41 -Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	65
Figura 4.42 -Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	66
Figura 4.43 -Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	66
Figura 4.44 -Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	67
Figura 4.45 -Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	67
Figura 4.46 -Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.....	68
Figura 4.47 - Comparação entre os Diagramas de Bode.....	68
Figura 4.48 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	70
Figura 4.49 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	70
Figura 4.50 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	71
Figura 4.51 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	71
Figura 4.52 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	72
Figura 4.53 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.....	72
Figura 4.54 -Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.....	73

Figura 4.55 -Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	74
Figura 4.56 -Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	74
Figura 4.57 -Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	75
Figura 4.58 -Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	75
Figura 4.59 -Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	76
Figura 4.60 -Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.....	76
Figura 4.61 -Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.....	77
Figura 4.62 -Comparação entre curvas.....	78
Figura 4.63 - Resposta ao degrau para o transformador contendo duas espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 1 kHz.....	79
Figura 4.64 -Resposta ao degrau para o transformador contendo duas espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 100 kHz.....	79
Figura 4.65 -Resposta ao degrau para o transformador contendo sete espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 100 kHz.....	80
Figura 4.66 -Resposta ao degrau para o transformador contendo 20 espiras no primário e 50 espiras no secundário com frequência de 200 kHz.....	80
Figura 4.67 - Resposta ao degrau para o transformador contendo 50 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco com frequência de 100 kHz.....	81

Figura 4.68 -Resposta ao degrau para o transformador contendo 200 espiras em disco no secundário e 50 espiras em anel no primário com frequência de 300 kHz.....	81
Figura 4.69 -Comparação entre a resposta computacional e experimental para o primeiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	82
Figura 4.70 -Comparação entre a resposta computacional e experimental para o segundo modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	82
Figura 4.71 -Comparação entre a resposta computacional e experimental para o terceiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	83
Figura 4.72 -Comparação entre a resposta computacional e experimental para o quarto modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	83
Figura 4.73 - Comparação entre a resposta computacional e experimental para o primeiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	84
Figura 4.74 - Comparação entre a resposta computacional e experimental para o segundo modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	84
Figura 4.75 - Comparação entre a resposta computacional e experimental para o terceiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	85
Figura 4.76 - Comparação entre a resposta computacional e experimental para o quarto modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.....	85
Figura 5.1 - Representação de um sinal periódico.....	86

Figura 5.2-	Onda quadrada com período de 2π	87
--------------------	-------------------------------------	----

Figura 5.3-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com apenas um termo ($n=1$)	92
--------------------	---	----

Figura 5.4-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com dois termos ($n=1$ e $n=3$)	92
--------------------	---	----

Figura 5.5-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com três termos ($n=1$, $n=3$ e $n=5$)	93
--------------------	---	----

Figura 5.6-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com quatro termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$ e $n=7$)	93
--------------------	---	----

Figura 5.7-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com cinco termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$, $n=7$ e $n=9$)	94
--------------------	--	----

Figura 5.8-	Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com seis termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$, $n=7$, $n=9$ e $n=11$)	94
--------------------	--	----

Figura 5.9-	Sinal da onda quadrada. Evolução do sinal a cada acréscimo dos termos na série de Fourier	95
--------------------	---	----

Figura 5.10-	Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e apenas um termo da série de Fourier	96
---------------------	---	----

Figura 5.11-	Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e dois termos da série de Fourier	96
---------------------	---	----

Figura 5.12-	Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e três termos da série de Fourier	97
---------------------	---	----

Figura 5.13-	Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e seis termos da série de Fourier	97
---------------------	---	----

Figura 5.14-	Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e apenas um termo da série de Fourier	98
---------------------	---	----

Figura 5.15- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e dois termos da série de Fourier.....	98
Figura 5.16- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e três termos da série de Fourier.....	99
Figura 5.17- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e seis termos da série de Fourier.....	99
Figura 5.18- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e apenas um termo da série de Fourier.....	100
Figura 5.19- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e dois termos da série de Fourier.....	100
Figura 5.20- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e três termos da série de Fourier.....	101
Figura 5.21- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e seis termos da série de Fourier.....	101
Figura 5.22- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e um termo da série de Fourier.....	102
Figura 5.23- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e dois termos da série de Fourier.....	102
Figura 5.24- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e três termos da série de Fourier.....	103
Figura 5.25- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e seis termos da série de Fourier.....	103
Figura 5.26- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e apenas um termo da série de Fourier.....	104
Figura 5.27- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e dois termos da série de Fourier.....	104

Figura 5.28- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e três termos da série de Fourier.....	105
Figura 5.29- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e seis termos da série de Fourier.....	105
Figura 5.30- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e apenas um termo da série de Fourier.....	106
Figura 5.31- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e dois termos da série de Fourier.....	106
Figura 5.32- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.....	107
Figura 5.33- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e seis termos da série de Fourier.....	107
Figura 5.34- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e apenas um termo da série de Fourier.....	108
Figura 5.35- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e dois termos da série de Fourier.....	108
Figura 5.36- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e três termos da série de Fourier.....	109
Figura 5.37- Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e seis termos da série de Fourier.....	109
Figura 5.38- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e apenas um termo da série de Fourier.....	110
Figura 5.39- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e dois termos da série de Fourier.....	111
Figura 5.40- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e três termos da série de Fourier.....	111

Figura 5.41- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e seis termos da série de Fourier.....	112
Figura 5.42- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e um termo da série de Fourier.....	112
Figura 5.43- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e dois termos da série de Fourier.....	113
Figura 5.44- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e três termos da série de Fourier.....	113
Figura 5.45- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e seis termos da série de Fourier.....	114
Figura 5.46- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e um termo da série de Fourier.....	114
Figura 5.47- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e dois termos da série de Fourier.....	115
Figura 5.48- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e três termos da série de Fourier.....	115
Figura 5.49- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e seis termos da série de Fourier.....	116
Figura 5.50- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e um termo da série de Fourier.....	116
Figura 5.51- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e dois termos da série de Fourier.....	117
Figura 5.52- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e três termos da série de Fourier.....	117
Figura 5.53- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e seis termos da série de Fourier.....	118

Figura 5.54- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e um termo da série de Fourier.....	118
Figura 5.55- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e dois termos da série de Fourier.....	119
Figura 5.56- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e três termos da série de Fourier.....	119
Figura 5.57- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e seis termos da série de Fourier.....	120
Figura 5.58- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e um termo da série de Fourier.....	120
Figura 5.59- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e dois termos da série de Fourier.....	121
Figura 5.60- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.....	121
Figura 5.61- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.....	122
Figura 5.62- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e um termo da série de Fourier.....	122
Figura 5.63- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e dois termos da série de Fourier.....	123
Figura 5.64- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e três termos da série de Fourier.....	123
Figura 5.65- Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e seis termos da série de Fourier.....	124
Figura 5.66- Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 7 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.....	125

Figura 5.67- Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 2 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.....126

Figura 5.68- Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 20 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.....126

Figura 5.69- Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 30 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.....127

Figura 5.70- Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 50 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.....127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Relações tensão-corrente, corrente-tensão, tensão- carga e impedância para capacitores, resistores e indutores.....	22
Tabela 4.1- Parâmetros do circuito equivalente que representa a bobina em anel.....	38
Tabela 4.2- Parâmetros do circuito equivalente que representa a bobina planar.....	38
Tabela 4.3- Valores encontrados para C_{par} e C_{ser} , que são as capacitâncias parasitas do circuito equivalente.....	39

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 PROPÓSITO DESSE TRABALHO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.3 METODOLOGIA EMPREGADA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
CAPÍTULO 2	25
2.1 MATERIAIS E MÉTODOS	25
2.2 BOBINAS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.3 EQUIPAMENTOS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.4 MÉTODOS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.5 CIRCUITOS EQUIVALENTES	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.6 CAPACITÂNCIA PARASITA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
CAPÍTULO 3	30
3.1 ANÁLISE DO SISTEMA	30
3.2 TERCEIRA CONFIGURAÇÃO PARA O CIRCUITO EQUIVALENTE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.3 QUARTA CONFIGURAÇÃO PARA O CIRCUITO EQUIVALENTE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
CAPÍTULO 4	37
4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.2 PARÂMETROS DOS CIRCUITOS EQUIVALENTES	38
4.3 CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA PARASITA... ..	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.4 SIMULAÇÕES PARA A PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.4.1 Resposta em onda quadrada	Erro! Indicador não definido.
4.4.2 Diagrama de Bode	Erro! Indicador não definido.
4.5 SIMULAÇÕES PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

4.5.1 Resposta em onda quadrada.....	Erro! Indicador não definido.
4.5.2 Diagrama de Bode	Erro! Indicador não definido.
4.6 SIMULAÇÕES PARA A TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.6.1 Resposta em onda quadrada.....	Erro! Indicador não definido.
4.6.2 Diagrama de Bode	Erro! Indicador não definido.
4.7 SIMULAÇÕES PARA A QUARTA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.7.1 Resposta em onda quadrada.....	Erro! Indicador não definido.
4.7.2 Diagrama de Bode	Erro! Indicador não definido.
4.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS: ENTRADA ONDA QUADRADA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
4.9 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS.	80
4.10 COMPARAÇÕES ENTRE CIRCUITOS EQUIVALENTES.	84
CAPÍTULO 5	85
5.1 ANÁLISE DE RESULTADOS PARA ONDA QUADRADA: SÉRIE DE FOURIER.....	85
5.2 REPRESENTAÇÃO DE SINAIS PERIÓDICOS VIA SÉRIE DE FOURIER. ..	85
5.3 SÉRIE DE FOURIER PARA UMA ONDA QUADRADA. .	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
5.4 RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA PARA O TRANSFORMADOR DE BOBINAS PLANAS TENDO COMO ENTRADA UMA ONDA QUADRADA.	94
5.5 COMPARAÇÕES DOS ARTIGOS COM OS RESULTADOS OBTIDOS.	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
CAPÍTULO 6	130
6.1 CONCLUSÕES	130
REFERÊNCIAS.....	132
APÊNDICE - CÓDIGOS NO MATLAB	137

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Quando se trata de fenômenos relacionados ao eletromagnetismo, geralmente, tem-se uma ideia complexa acerca desse assunto. Contudo, o eletromagnetismo está entre uma das teorias mais sólidas existentes dentro da física, facilitando o estudo relacionado aos fenômenos eletromagnéticos. Dentro desse grande campo que é a teoria eletromagnética, como a eletrostática, magnetostática, transmissão de ondas eletromagnéticas, muitos deles apresentam aplicações que transformaram a vida humana, entre essas aplicações, se destaca a indução eletromagnética, que possibilitou a construção de circuitos magneticamente acoplados, os transformadores [1].

Os transformadores são dispositivos de quatro terminais composto por duas ou mais bobinas acopladas magneticamente, sendo usados para transmissão de energia elétrica ou potência elétrica de um circuito para outro [1], fazendo o isolamento entre os circuitos, pois não há contato físico entre o primário e secundário de um transformador [1], conforme visto na Figura 1.1.

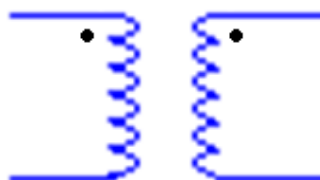


Figura 1.1: Bobina do primário isolado do secundário.

O transformador, também, faz transformação de tensão e corrente de acordo com a relação de transformação do mesmo, onde essa relação está associada à quantidade de enrolamentos das bobinas do primário e secundário de acordo com a relação abaixo [2]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.1)$$

Em que V_1 é a tensão aplicada no primário, V_2 a tensão no secundário, N_1 número de espiras do primário e N_2 número de espiras do secundário.

A transferência de energia que um transformador realiza entre circuitos que estão ligados um no primário e outro no seu secundário, como mostrado na Figura 1.2, ocorre via indução eletromagnética, ou seja, sem contato físico, que determina transmissão de energia elétrica sem o uso de fio.

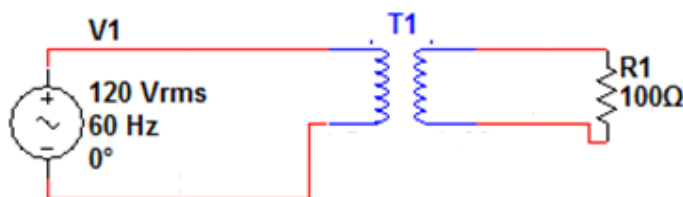


Figura 1.2: Circuito ligado via transformador.

Os transformadores apresentam várias características importantes em sua fabricação. Entre elas, está o fator de acoplamento magnético entre a bobina do primário e do secundário. Para o caso ideal, esse acoplamento é igual a 1. Nessa situação o transformador é considerado ideal [1,2]. O coeficiente de acoplamento é a medida do acoplamento magnético entre duas bobinas [1].

Quando se trata de um transformador construído com bobinas planas, para analisá-lo em resposta em frequência, na ressonância, deseja-se modelá-lo. Neste caso, é necessário realizar certas considerações, entre elas, efeitos associados a parâmetros como: indutância, indutância mútua e capacitâncias parasitas [2].

A indutância é um elemento passivo que armazena energia em seu campo magnético. A indutância é intrínseca à constituição do fio, e o próprio enrolamento do primário e secundário apresentam tal indutância, conhecida como indutância-própria [3].

Quando duas bobinas estão próximas, como é o caso do primário de um transformador e o seu secundário, por exemplo, o fluxo magnético causado pela corrente de uma bobina atravessa a outra, induzindo uma tensão nessa última de acordo com a lei de Faraday [3]. Geralmente a indutância própria e mútua são representadas por L e M , respectivamente [1-3].

Ao se trabalhar com indutores em altas frequências, costuma-se levar em consideração o fato da impedância do indutor não ser ideal, passando a considerar o efeito de uma capacitância parasita atrelada ao indutor [4]. A capacitância parasita pode ser considerada em relação às bobinas e em relação à terra. No caso de transformadores de bobinas planas, essa capacitância parasita é determinada através de parâmetros de construção das mesmas, como diâmetro do fio usado e a distância entre as bobinas [5].

Um conceito importante no estudo de dispositivos que contêm elementos indutivos e capacitivos é a ressonância. Ressonância é a tendência que um sistema tem a oscilar em máximas amplitudes [6]. Isso ocorre quando a reatância capacitiva e a reatância indutiva de um transformador são iguais. Assim, a reatância total será igual a zero e então a impedância do circuito admitirá seu menor valor, pois assumirá apenas a resistência interna dos condutores [7].

Ao se analisar um sistema, geralmente procura-se encontrar a função de transferência desse sistema. A função transferência é uma operação que, algebricamente, relaciona a saída do sistema à sua entrada [8].

Inicia-se escrevendo uma equação diferencial linear geral de enésima ordem e invariante no tempo da seguinte forma:

$$a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 c(t) = b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 r(t) \quad (1.2)$$

Onde $c(t)$ é a saída, $r(t)$ é a entrada e os coeficientes a_i e b_i e a forma da equação diferencial representam o sistema. Aplicando-se a transformada de Laplace a ambos os lados da equação, tem-se:

$$a_n s^n C(s) + a_{n-1} s^{n-1} C(s) + \dots + a_0 C(s) + \text{Condição inicial}$$

Termos envolvendo $c(t)$

$$= b_m s^m R(s) + b_{m-1} s^{m-1} R(s) + \dots + b_0 R(s) + \text{Condição inicial}$$

Termos envolvendo $r(t)$

(1.3)

A Equação (1.3) é uma expressão puramente algébrica. Admitindo-se que todas as condições iniciais sejam iguais a zero [8], a Equação (1.3) se reduz a:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0) C(s) = [(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0) R(s)] \quad (1.4)$$

Expressa-se agora a relação entre a transformada da saída, $C(s)$, e a transformada da entrada, $R(s)$:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s) = \frac{(b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0)}{(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0)} \quad (1.5)$$

Com isso tem-se $G(s)$ de um determinado sistema, denominada função de transferência.

Costuma-se representar a função de transferência através do uso de diagrama de blocos conforme mostrado na Figura 1.3.

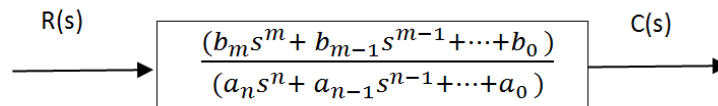


Figura 2.3: Diagrama de bloco de uma função de transferência [8].

Todo circuito elétrico que apresenta elementos passivos, como resistores, capacitores e indutores, podem ser modelados por uma função de transferência [9].

Geralmente, no domínio do tempo, nem sempre é simples fazer análise de circuito RLC. Devido a essa dificuldade, usa-se a representação do circuito no domínio da frequência, onde através da transformada de Laplace se obtém o equivalente de cada componente passivo (capacitor, indutor e resistor) na frequência [9].

Na Tabela 1, tem-se as seguintes relações para capacitores, indutores e resistores no domínio do tempo e frequência.

Tabela 1 Relações tensão-corrente, corrente-tensão, tensão-carga e impedância para capacitores, resistores e indutores.

Componente	Tensão-corrente	Corrente-tensão	Tensão-carga	Impedância $Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)}$	Admitância $Y(s) = \frac{I(s)}{V(s)}$
Capacitor	$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$	$v(t) = \frac{1}{C} q(t)$	$\frac{1}{Cs}$	Cs
Resistor	$v(t) = Ri(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$	$v(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$	R	$\frac{1}{R} = G$
Indutor	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau$	$v(t) = L \frac{d^2q(t)}{dt^2}$	Ls	$\frac{1}{Ls}$

Com o uso da Tabela 1, é possível fazer a conversão do tempo para frequência ou vice-versa para cada componente de qualquer circuito elétrico facilitando assim a análise do mesmo.

Uma maneira bastante interessante de se analisar circuitos no domínio da frequência é através do uso do diagrama de Bode [9,10]. Os diagramas de Bode (módulo e fase) são uma das formas de caracterizar sinais no domínio da frequência [10].

O diagrama de Bode permite mostrar a resposta do sistema relacionando a sua dependência com o valor da frequência explicitamente [10].

1.2 Propósito desse trabalho

Esse trabalho analisará efeitos de indução eletromagnética em transformadores construídos com bobinas planas, onde se estudará efeitos de altos ganhos associados à ressonância do transformador. Terá também um estudo de resposta em frequência do modelo teórico do transformador de bobinas planas e anelares. Análise no regime transitório e permanente serão realizados nesse trabalho. Os transformadores e seus efeitos são de fundamental importância no curso de engenharia elétrica e são estudados ao longo de quase todo o curso. Com isso, deseja-se fazer uma contribuição de fenômenos que não são comuns na literatura sobre estudos de transformadores.

1.3 Metodologia empregada

Para dar início ao projeto, primeiro se fará uma revisão bibliográfica sobre transformadores, ressonância, capacitância parasita, função de transferência, ganho, indutâncias e diagrama de bode.

Em seguida, se irá ao laboratório com o intuito de obter respostas empíricas a excitações de onda quadrada e senoidal como entrada no primário do transformador de bobinas planas e anelares e obtendo como saída no secundário do mesmo, onde se variará a frequência com o intuito de se obter a resposta do sistema em seu estado de ressonância a fim de verificar o alto ganho proporcionado pelo dispositivo em seu estado de ressonância, pois esse alto ganho na frequência de ressonância contraria a relação de transformação intrínseca na construção de um transformador.

O próximo passo será a busca de um modelo matemático para o modelo encontrando empiricamente no laboratório, onde foi proposto um circuito equivalente para esse transformador de bobinas planas. Esse circuito será modelado através do uso do MATLAB onde se usará a função de transferência do circuito equivalente, assim se estudará o circuito no domínio da frequência e tempo, considerando o regime transitório e permanente.

Por fim, se analisará os resultados de forma comparativa entre os encontrados no laboratório e os computacionais.

1.4 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, são apresentados os métodos e materiais usados. Nele são apresentados detalhes da montagem dos transformadores construídos com bobinas planas, onde os diâmetros das bobinas e dos fios foram evidenciados. Também são identificados os equipamentos usados no laboratório para colher os dados experimentais.

No Capítulo 3, é trabalhada a função de transferência para o modelo usado do transformador ensaiado no laboratório.

No Capítulo 4, a análise computacional é apresentada comparativamente com os resultados experimentais. Os resultados em regime transitório e permanente também são mostrados, juntamente com as respostas às excitações no primário por diferentes entradas, e o seu efeito no secundário, principalmente a resposta do transformador no seu estado de ressonância.

No capítulo 5, encontra-se resposta a entrada em onda quadrada.

No capítulo 6, encontram-se as conclusões do projeto desenvolvido.

CAPÍTULO 2

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas as especificações das bobinas usadas para construção do transformador, os equipamentos utilizados para coletar as informações do sistema montado e os métodos usados para se realizar os experimentos.

2.2 BOBINAS

Para este trabalho de conclusão de curso, foram utilizadas sete bobinas planas com número de espiras 2, 7, 15, 20, 30, 50 e 200. Todas as bobinas montadas tinham o diâmetro de $D = 46.5 \text{ mm}$, com fio de cobre esmaltado com o diâmetro de $d = 0.202 \text{ mm}$. Nas bobinas com menos de 200 espiras, as suas alturas coincidem com seus próprios diâmetros do fio ($h = d = 0.202 \text{ mm}$) e nos casos das bobinas de 200 espiras as alturas foram $h = 0.5 \text{ mm}$. As bobinas apresentam suas espiras uniformemente espaçadas na forma espiral do centro para a extremidade [11-15]. Na Figura 2.1, é exibido o transformador de bobinas planas ensaiado no laboratório.

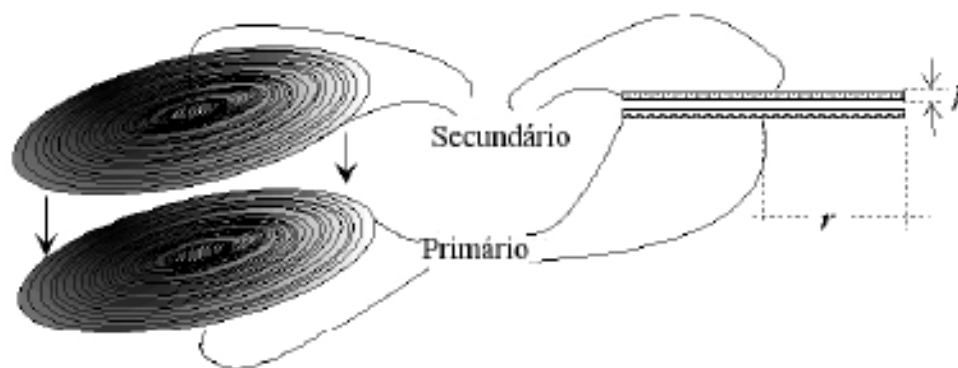


Figura 2.1 Transformador de bobinas planas ensaiado no laboratório.

Na Figura 2.2 se vê a configuração, onde se tem o primário do transformador na topologia em anel e o secundário em disco.

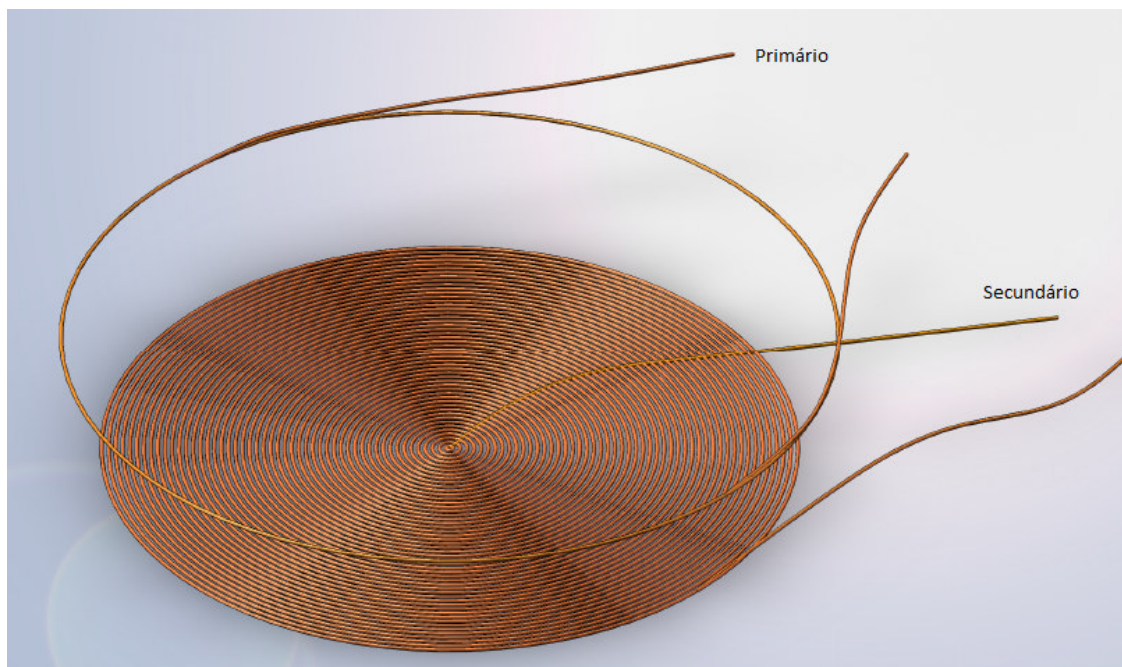


Figura 2.2 Transformador tendo o primário em anel e o secundário em disco.

2.3 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados para execução dos experimentos foram:

- Um osciloscópio digital Agilent Technologies DSO3202A, com ponta de prova N2862A de 12 pF de capacitância de entrada,
- Um gerador de funções Rigol DG2021A,
- Um multímetro digital Agilent Technologies U1252A;

O osciloscópio foi usado para obter as formas de onda do secundário do transformador, o gerador de funções foi usado para excitar a entrada do primário do transformador, tanto com onda quadrada quanto onda senoidal e o multímetro usado para medir resistências do transformador.

2.4 MÉTODOS

Os experimentos foram realizados com excitação do primário do transformador (bobina primária), sendo ela planar ou anelar. Entrava-se com uma onda quadrada ou senoidal de 5 V pico a pico no transformador e se coletava a resposta do primário e do secundário do transformador através do osciloscópio citado na seção 2.3. Os sinais fornecidos pelo gerador de funções tinham suas frequências variadas de 1kHz a 25 MHz.

Os resultados de tensão no primário e secundário do transformador foram analisados. Estudou-se também o comportamento de tensão na frequência de ressonância do transformador juntamente com o comportamento das bobinas nessa situação.

2.5 CIRCUITOS EQUIVALENTES

Para modelar esse sistema (transformadores de bobinas planas), primeiramente se fez um circuito simples onde apenas se considerou uma resistência em série com um indutor para modelar o primário fazendo a mesma consideração para o secundário e considerando uma indutância para representar o acoplamento entre as bobinas do transformador, em que esse modelo está representado na Figura 2.2. Nesta Figura, L_{12} é a indutância mútua [16-20].

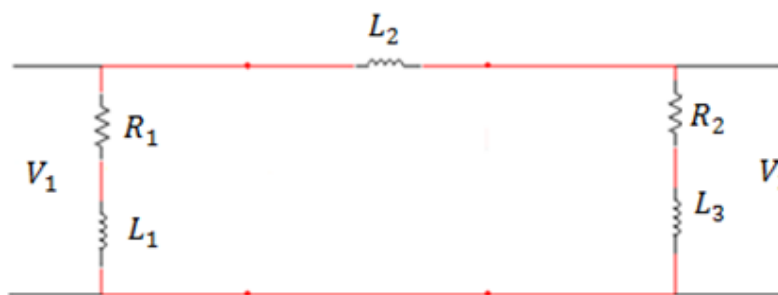


Figura 2.3 Primeira consideração do circuito equivalente do transformador.

Essa configuração foi a primeira a ser considerada. Porém esse esquema mostrava-se bastante simples sem nenhuma capacitância parasita, o que se torna inviável para a análise de ressonância [21-25]. Então, partiu-se para uma segunda configuração onde se acrescentou capacitâncias parasitas ao possível modelo. Isso está mostrado de acordo com a Figura 2.4

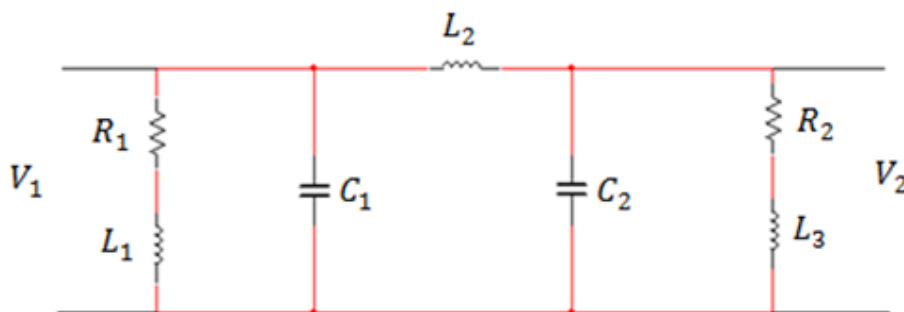


Figura 2.4 Segunda consideração do circuito equivalente do transformador.

Esse circuito apresenta duas capacitâncias parasitas na tentativa de obter resultados mais próximos das respostas em frequência, contudo como será mostrado nos próximos capítulos a terceira e quarta configuração apresentaram respostas mais próximas do obtido no laboratório [26-30]. Nas Figuras 2.5 e 2.6 temos a terceira e quarta configuração que foram usadas na modelagem do transformador de bobinas planas.

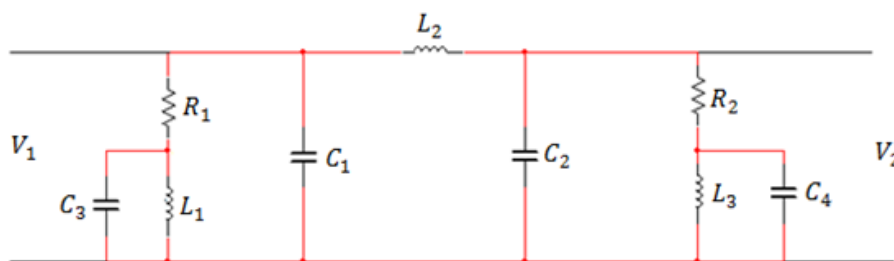


Figura 2.5 Terceira consideração do circuito equivalente do transformador.

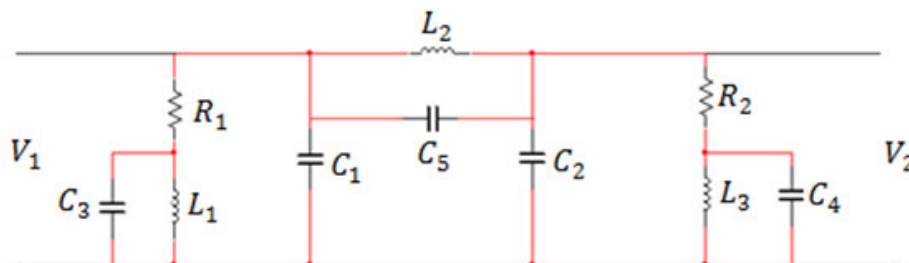


Figura 2.6 Quarta consideração do circuito equivalente do transformador.

Tanto a terceira quanto a quarta configuração do circuito equivalente são mais complexas que a primeira e a segunda, pois nelas se têm capacitâncias parasitas tanto entre os elementos passivos quanto em relação à terra [31-37]. Observa-se que em altas frequências não se pode deixar de considerar o efeito das capacitâncias parasitas.

2.6 CAPACITÂNCIA PARASITA

As capacitâncias parasitas podem ser calculadas usando-se a seguinte fórmula [38-40]:

$$C_{ts} = \frac{2\pi^2 D \epsilon_0}{\ln \left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 - 1} \right)} \quad (21)$$

Onde D é o diâmetro da bobina, r é raio do fio, h a altura das espiras e ϵ_0 a permeabilidade magnética no vácuo. Com essa equação, calculou-se as capacitâncias parasitas de cada modelo usado [41-44].

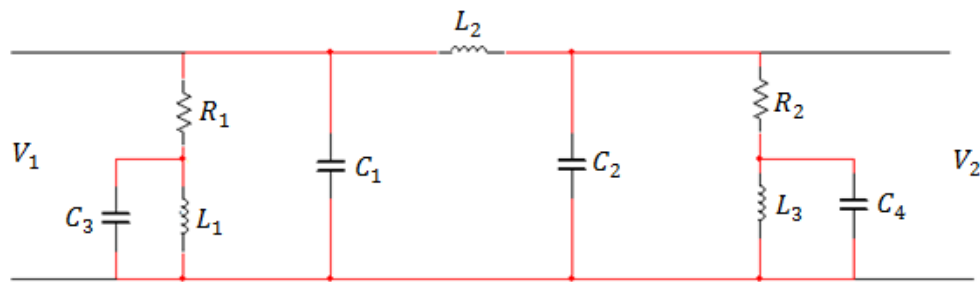
CAPÍTULO 3

3.1 ANÁLISE DO SISTEMA

Este capítulo apresenta detalhes da terceira e quarta configuração do circuito equivalente a ser simulado no MATLAB. Será mostrado ao longo do capítulo o destrinchamento das funções de transferência dos dois circuitos usados para representar o transformador de bobinas planas.

3.2 TERCEIRA CONFIGURAÇÃO PARA O CIRCUITO EQUIVALENTE

Como mostrado no capítulo anterior, temos a Figura 3.1 ilustrando a terceira configuração. Esta configuração é a mais realista para a análise proposta neste trabalho, pois considera as capacitâncias parasitas, as quais apresentam grande influência na análise em alta frequência.



Figur

a 3.1 Terceira configuração do circuito equivalente

Para analisar esse circuito, é mais simples mudar do domínio do tempo para o domínio da frequência, e a técnica usada foi a transformada de Laplace [45].

Sabendo que no domínio da frequência temos:

Para a resistência: R

Para o indutor: sL

Para o capacitor: $\frac{1}{sC}$

Logo, o circuito acima fica da seguinte forma no domínio da frequência:

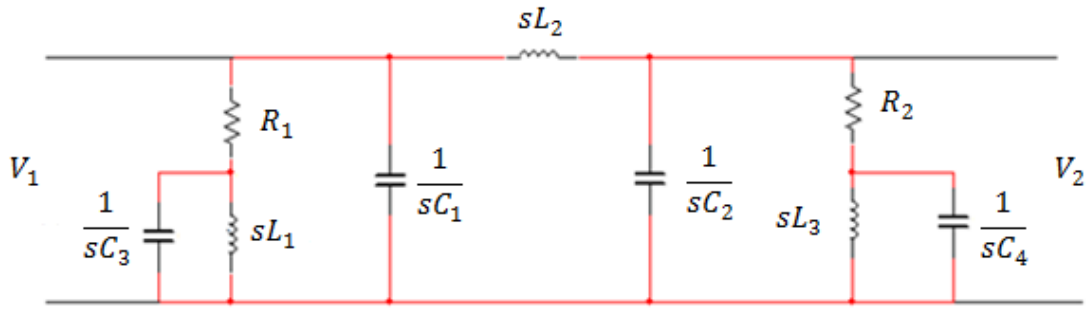


Figura 3.2 Circuito equivalente no domínio da frequência.

Para encontrar a função de transferência, $G(s) = \frac{V_2}{V_1}$, do circuito da Figura 3.2, primeiramente se faz a redução do circuito, encontrando as impedâncias equivalentes [46].

Inicialmente encontrou-se o equivalente entre o capacitor C_3 e L_1 , pois o paralelo entre eles podem ser expresso da seguinte forma:

$$Z_{equ1} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1)$$

Onde

$$Z_1 = \frac{1}{sC_3} \quad (3.2)$$

$$Z_2 = sL_1 \quad (3.3)$$

Substituindo (3.2) e a (3.3) na Equação (3.1), temos:

$$Z_{equ1} = \frac{\frac{1}{sC_3} sL_1}{\frac{1}{sC_3} + sL_1} \quad (3.4)$$

Fazendo as multiplicações e simplificações possíveis, temos o seguinte valor para Z_{equ1} :

$$Z_{equ1} = \frac{sL_1}{s^2 L_1 C_3 + 1} \quad (3.5)$$

De forma análoga temos:

$$Z_{equ2} = \frac{sL_3}{s^2 L_3 C_4 + 1} \quad (3.6)$$

O circuito fica reduzido conforme mostrado na Figura 3.3.

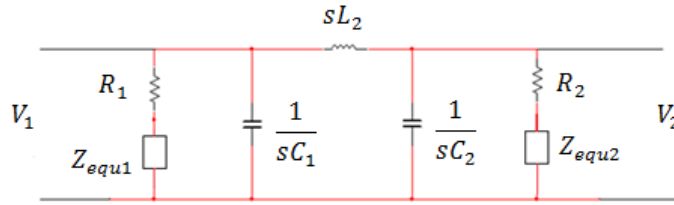


Figura 3.3 Circuito equivalente reduzido.

O próximo passo da simplificação é encontrar o equivalente série de Z_{equ1} e R_1 , que será expresso por:

$$Z_{equ3} = Z_{equ1} + R_1 \quad (3.7)$$

Substituindo (3.5) e (3.7) temos:

$$Z_{equ3} = \frac{sL_1}{s^2L_1C_3 + 1} + R_1 \quad (3.8)$$

Somando os termos da equação (3.8), tem-se:

$$Z_{equ3} = \frac{s^2L_1C_3R_1 + sL_1 + R_1}{s^2L_1C_3 + 1} \quad (3.9)$$

Analogamente, temos:

$$Z_{equ4} = Z_{equ2} + R_2 \quad (3.10)$$

E conseqüentemente:

$$Z_{equ4} = \frac{s^2L_2C_4R_2 + sL_2 + R_2}{s^2L_2C_4 + 1} \quad (3.11)$$

Agora o circuito pode ser representado conforme a Figura 3.4.

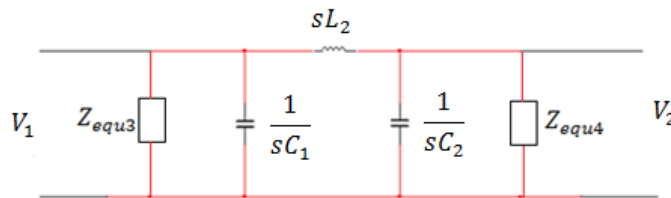


Figura 3.4 Simplificação do circuito equivalente.

Fazendo o equivalente em paralelo de Z_{equ3} com $\frac{1}{sC_1}$, tem-se:

$$Z_{equ5} = \frac{\frac{Z_{equ3.1}}{sC_1}}{Z_{equ3} + \frac{1}{sC_1}} \quad (3.12)$$

Substituindo (3.9) em (3.12), fica:

$$Z_{equ5} = \frac{\frac{s^2 L_1 C_3 R_1 + sL_1 + R_1}{s^2 L_1 C_3 + 1} \cdot \frac{1}{sC_1}}{\frac{s^2 L_1 C_3 R_1 + sL_1 + R_1}{s^2 L_1 C_3 + 1} + \frac{1}{sC_1}} \quad (3.13)$$

Simplificando (3.13) se tem:

$$Z_{equ5} = \frac{s^2 L_1 C_3 R_1 + sL_1 + R_1}{s^3 L_1 C_3 C_1 R_1 + s^2 (L_1 C_1 + L_1 C_3) + sR_1 C_1 + 1} \quad (3.14)$$

De forma análoga, temos:

$$Z_{equ6} = \frac{\frac{Z_{equ4.1}}{sC_2}}{Z_{equ4} + \frac{1}{sC_2}} \quad (3.15)$$

E consequentemente:

$$Z_{equ6} = \frac{s^2 L_3 C_4 R_2 + sL_3 + R_2}{s^3 L_3 C_4 C_2 R_2 + s^2 (L_3 C_2 + L_3 C_4) + sR_2 C_2 + 1} \quad (3.16)$$

Com essas simplificações, o circuito pode ser ilustrado de acordo com a Figura 3.5.

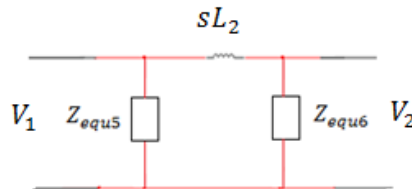


Figura 3.5 Circuito simplificado.

A partir do circuito da Figura 3.5, pode-se encontrar a função de transferência desse circuito usando a técnica de divisão de tensão de acordo com a equação (3.17).

$$V_2 = \frac{Z_{equ6} V_1}{Z_{equ6} + sL_2} \quad (3.17)$$

Substituindo (3.16) em (3.17) temos a seguinte função de transferência para o circuito da Figura 3.5:

$$G(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{s^2 L_2 C_4 R_2 + sL_2 + R_2}{s^4 L_3 C_4 C_2 R_2 L_2 + s^3 L_2 (L_3 C_2 + L_3 C_4) + s^2 (C_3 C_4 R_2 + L_2 R_2 C_2) + s(L_3 + L_2) + R_2} \quad (3.18)$$

Com essa função de transferência poderemos analisar o circuito, computacionalmente, usando o MATLAB com relação a sua resposta em frequência, como será mostrada no próximo capítulo.

3.3 QUARTA CONFIGURAÇÃO PARA O CIRCUITO EQUIVALENTE

No capítulo anterior, a 4º configuração também foi apresentada, e está ilustrada na Figura 3.6. Este modelo é mais real porque apresenta capacitâncias parasitas, o que influencia muito quando se trabalha em altas frequências [47].

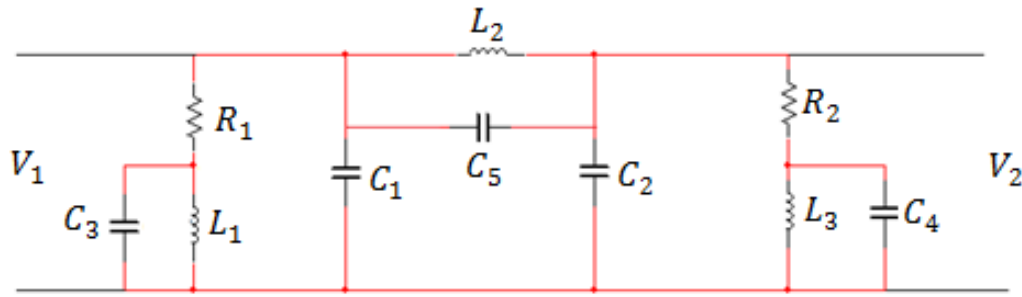


Figura 3.6 Quarta configuração do circuito equivalente.

Convertendo esse circuito para o domínio da frequência teremos a seguinte representação:

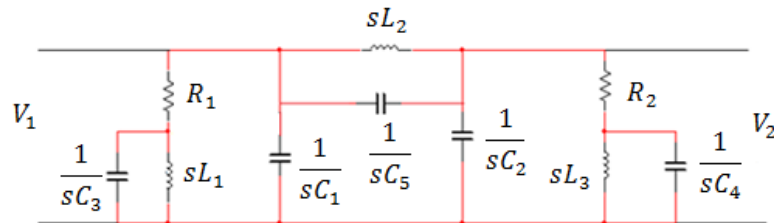


Figura 3.7 Quarta configuração do circuito equivalente no domínio da frequência.

Essa configuração difere da terceira configuração, pois se considera que também há uma capacitância parasita entre a bobina L_2 , que representa o acoplamento entre o primário e o secundário [48]. De forma análoga ao que foi feito para o terceiro circuito equivalente, também se precisou encontrar a função de transferência do circuito representado na Figura 3.7 para posteriormente se simular no MATLAB.

Tomando a 3ª configuração do circuito equivalente como base, podemos usar alguns resultados encontrados e escrever o circuito da Figura 3.7 da seguinte forma:

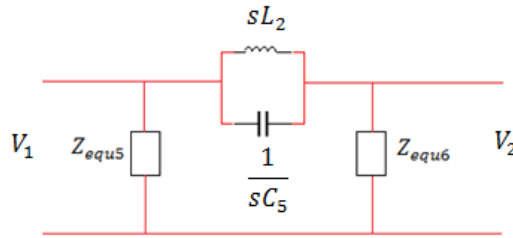


Figura 3.8 Circuito equivalente com a capacitância parasita em paralelo com bobina L_2 .

Como não houve alteração nos componentes do primário e secundário nesse quarto modelo de circuito equivalente usado para representar o transformador de bobinas planas [49], mudando apenas a representação do acoplamento entre o primário e secundário do transformador, aproveitou-se os resultados obtidos na terceira configuração.

Onde Z_{eq5} e Z_{eq6} são expressos por:

$$Z_{eq5} = \frac{s^2 L_1 C_3 R_1 + s L_1 + R_1}{s^3 L_1 C_3 C_1 R_1 + s^2 (L_1 C_1 + L_1 C_3) + s R_1 C_1 + 1} \quad (3.19)$$

E por:

$$Z_{eq6} = \frac{s^2 L_3 C_4 R_2 + s L_3 + R_2}{s^3 L_3 C_4 C_2 R_2 + s^2 (L_3 C_2 + L_3 C_4) + s R_2 C_2 + 1} \quad (3.20)$$

Com isso, pode-se encontrar um circuito mais reduzido, encontrando uma configuração equivalente do paralelo entre L_2 e C_5 .

Logo, o paralelo entre os componentes L_2 e C_5 podem ser encontrado conforme abaixo:

$$Z_{equ7} = \frac{(sL_2) \cdot \frac{1}{sC_3}}{sL_2 + \frac{1}{sC_3}} \quad (3.21)$$

Fazendo as multiplicações, divisões e simplificações devidas tem-se:

$$Z_{equ7} = \frac{sL_2}{s^2L_2C_3 + 1} \quad (3.22)$$

Com o resultado da Equação (3.22), pode-se escrever o circuito equivalente de acordo com a Figura 3.9.

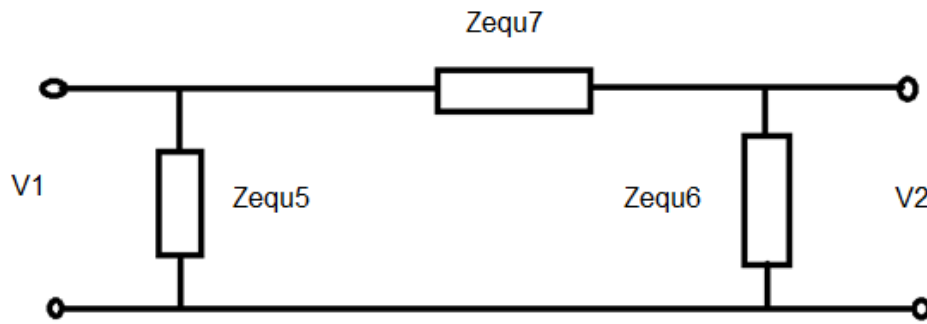


Figura 3.9 Circuito simplificado usado para encontrar a função de transferência.

Através do circuito exibido na Figura 3.9, pode-se usar novamente divisão de tensão para encontrar a função de transferência.

Portanto,

$$V_2 = \frac{Z_{equ6} * V_1}{Z_{equ6} + Z_{equ7}} \quad (3.23)$$

A função de transferência pode ser representada por:

$$G(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_{equ6}}{Z_{equ6} + Z_{equ7}} \quad (3.24)$$

Substituindo (3.20) e (3.22) em (3.24) temos a seguinte expressão da função

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{z_3s^4 + z_4s^3 + z_5s^2 + z_2s + z_1}{(p_3s^4 + p_4s^3 + p_5s^2 + p_2s + p_1)} \quad (3.25)$$

Em que:

- $z_5 = L_3 C_4 R_2 L_2 C_5;$
- $z_4 = L_3 L_2 C_5;$
- $z_3 = L_2 C_5 R_2 + L_3 C_4 R_2;$
- $z_2 = L_3;$
- $z_1 = R_2;$
- $p_5 = L_2 C_5 L_3 C_4 R_2 + L_2 L_3 C_4 C_2 R_2;$
- $p_4 = L_2 C_5 L_3 + L_2 L_3 C_2 + L_2 L_3 C_4;$
- $p_3 = L_2 C_5 R_2 + L_3 C_4 R_2 + L_2 R_2 C_2;$
- $p_2 = L_3 + L_2;$
- $p_1 = R_2;$

Com o uso dessa função de transferência, pode-se encontrar as respostas do sistema no campo computacional, o que será mostrado nos capítulos posteriores.

CAPÍTULO 4

4.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esse capítulo aborda as simulações computacionais e os experimentos realizados em laboratório, bem como a comparação dos resultados obtidos. Assim, analisa-se qual modelo do circuito equivalente proposto no Capítulo 3 é mais apropriado para representar o transformador de bobinas planas.

4.2 PARÂMETROS DOS CIRCUITOS EQUIVALENTES.

De acordo com [11], foi possível se conhecer alguns parâmetros dos circuitos equivalentes de acordo com as Tabelas 4.1 e 4.2, onde os valores determinados foram usados na simulação computacional.

Tabela 4.1 Parâmetros do circuito equivalente que representa a bobina em anel.

n	$R_2(\Omega)$	$L_2(H)$	$C_2(F)$	$d(m)$	$L_1(H)$
2(anel)	0.8	1.72×10^{-7}	8.24×10^{-10}	1.8×10^{-4}	2.18×10^{-5}
5(anel)	0.62	1.69×10^{-7}	3.68×10^{-9}	2.02×10^{-4}	5.45×10^{-5}
7(anel)	1.81	1.72×10^{-7}	4.94×10^{-9}	1.8×10^{-4}	7.64×10^{-5}
9(anel)	2.2	1.72×10^{-7}	6.59×10^{-9}	1.8×10^{-4}	9.82×10^{-5}
10(anel)	2.48	1.72×10^{-7}	7.41×10^{-9}	1.8×10^{-4}	1.091×10^{-4}
12(anel)	2.8	1.72×10^{-7}	9.06×10^{-9}	1.8×10^{-4}	1.309×10^{-4}
15(anel)	3.49	1.72×10^{-7}	1.15×10^{-8}	1.8×10^{-4}	1.6364×10^{-4}
20(anel)	1.73	1.69×10^{-7}	1.75×10^{-8}	2.02×10^{-4}	2.182×10^{-4}
30(anel)	6.78	1.72×10^{-7}	2.39×10^{-8}	1.8×10^{-4}	2.373×10^{-4}
50(anel)	11.1	1.72×10^{-7}	4.04×10^{-8}	1.8×10^{-4}	5.455×10^{-4}

Tabela 4.2 Parâmetros do circuito equivalente que representa a bobina planar.

n	$R_1(\Omega)$	$L_1(H)$	$C_1(F)$	$C_2(F)$	$d(m)$
10(planar)	0.5	4.33×10^{-7}	7.41×10^{-9}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
20(planar)	0.89	1.85×10^{-6}	1.75×10^{-8}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
30(planar)	1.25	4.07×10^{-6}	2.39×10^{-8}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
40(planar)	1.89	1.89×10^{-6}	2.02×10^{-8}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
50(planar)	2.39	2.39×10^{-6}	4.04×10^{-8}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
200(planar)	7.87	7.87×10^{-4}	9.21×10^{-10}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
500(planar)	54.22	54.22×10^{-4}	3.68×10^{-10}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}
1600(planar)	72.55	72.55×10^{-2}	1.15×10^{-10}	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-4}

4.3 CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA PARASITA.

Como foi demonstrada no Capítulo 2, a capacitância (C_A) pode se calculada usando a equação (4.1).

$$C_A = \frac{2\pi^2 D \epsilon_0}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)} \quad (4.1)$$

Onde sabemos que D é o diâmetro da bobina, h altura das espiras e r o raio do fio usado.

De acordo com [12] pôde-se calcular C_S usando a Equação (4.2).

$$C_S = \frac{C_A}{n-1} \quad (4.2)$$

Onde n representa o número de espiras. Com isso, C_A e C_S , após serem calculados, para diferentes números de espiras (n), tiveram seus valores organizados na Tabela 4.3

Tabela 4.3 Valores encontrados para C_A e C_S , que são as capacitâncias parasitas do circuito equivalente.

n	C_A (F)	C_S , (F)
2(anel)	8.08×10^{-12}	8.08×10^{-12}
5(anel)	8.08×10^{-12}	2.02×10^{-12}
7(anel)	8.08×10^{-12}	1.35×10^{-12}
9(anel)	8.08×10^{-12}	1.01×10^{-12}
10(anel)	8.08×10^{-12}	8.98×10^{-13}
12(anel)	8.08×10^{-12}	7.34×10^{-13}
15(anel)	8.08×10^{-12}	5.77×10^{-13}
20(anel)	8.08×10^{-12}	4.25×10^{-13}
30(anel)	8.08×10^{-12}	2.79×10^{-13}
50(anel)	8.08×10^{-12}	1.65×10^{-13}

Conhecidos os parâmetros dos circuitos equivalentes, puderam-se realizar as simulações computacionais. É o que será mostrado na próxima seção.

4.4 SIMULAÇÕES PARA A PRIMEIRA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.

Como foi mostrado no Capítulo 2 na Figura 2.2, tem-se a primeira configuração para o circuito equivalente, onde essa consideração é simples e limitada para baixas frequências, apresentando apenas resistências e indutâncias para a representação do primário e secundário do transformador de bobinas planas e uma indutância mútua para representar o acoplamento entre o primário e secundário.

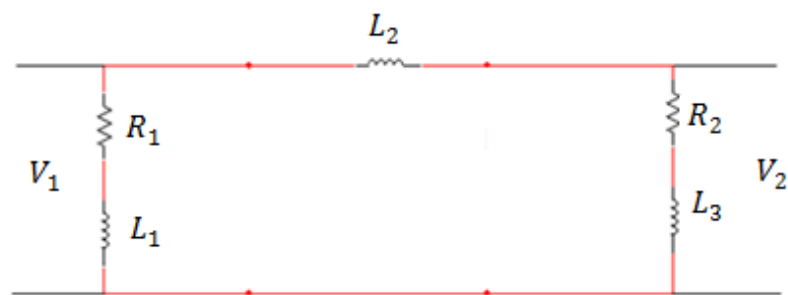


Figura 4.1 Configuração analisada.

Desenvolvendo a função de transferência e sabendo que no domínio da frequência temos:

Para resistência: R

Para o indutor: sL

Para o capacitor: $1/(sC)$

Por divisão de tensão se tem:

$$V_2 = \frac{Z_{equ2} \cdot V_1}{Z_{equ2} + Z_{equ1}} \quad (4.3)$$

Onde

$$Z_{equ2} = R2 + s.L3 \quad (4.4)$$

$$Z_{equ1} = s.L2 \quad (4.5)$$

Logo,

$$V_2 = \frac{(R_2 + sL_2)V_1}{R_2 + sL_1 + sL_2} \quad (4.6)$$

Na forma final temos:

$$G(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{sL_2 + R_2}{s(L_1 + L_2) + R_2} \quad (4.7)$$

Logo, com essa função de transferência, é possível obter respostas no MATLAB no secundário do transformador (V_2) para qualquer entrada no primário (V_1).

4.4.1 Resposta ao degrau

A Figura 4.2 mostra a resposta do transformador tendo um degrau na entrada contendo 2 espiras no primário na configuração em anel, para o número de espiras igual a 50 no seu secundário na configuração em disco (planar).

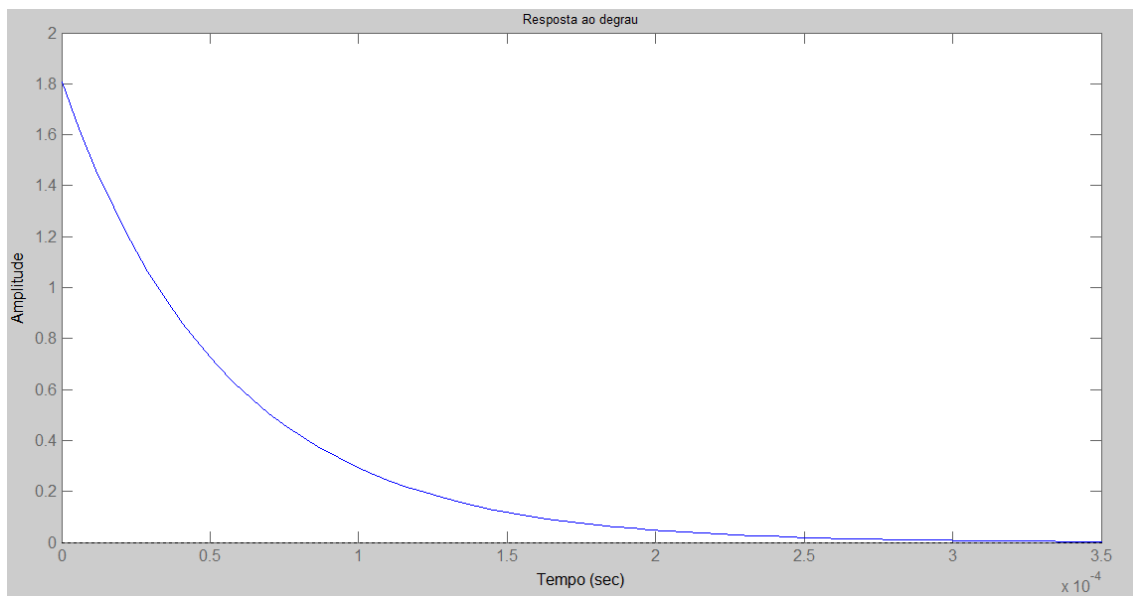


Figura 4.2 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A Figura 4.3 apresenta a resposta do mesmo sistema, porém com o número de espiras no seu primário igual a 7 em anel.

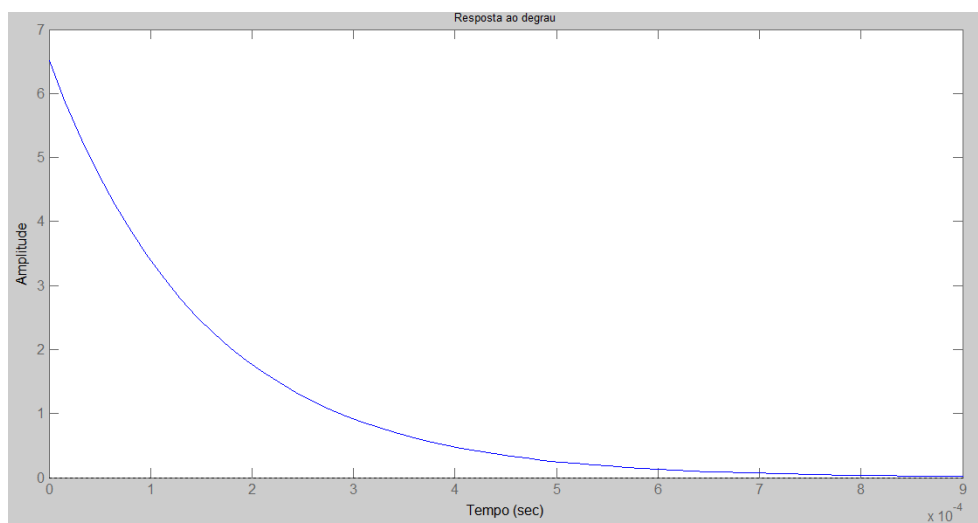


Figura 4.3 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Na Figura 4.3, vê-se que, com o aumento da resistência, devido ao aumento do número de espiras, a resposta se torna mais lenta.

Na Figura 4.4, vê-se a resposta do sistema tendo 15 espiras no primário na configuração em anel e no seu secundário 50 espiras na configuração em disco.

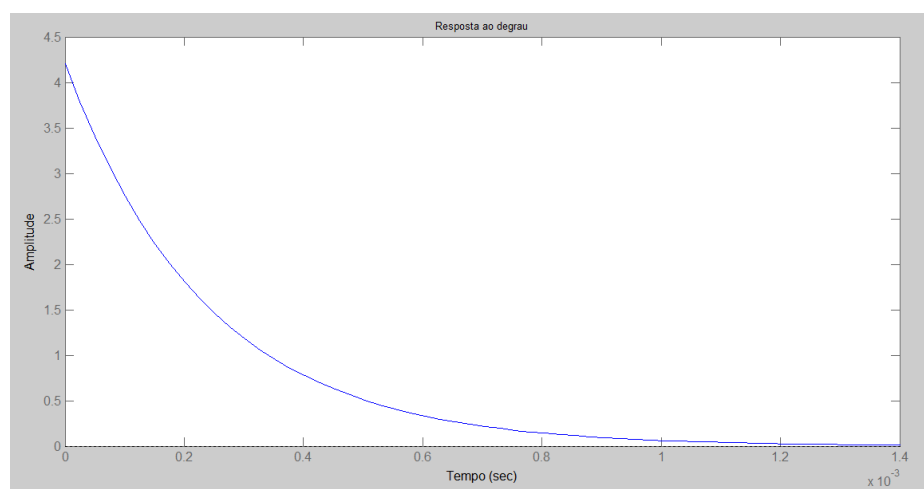


Figura 4.4 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

É possível perceber essa pequena diferença de equilíbrio atingido em cada gráfico de acordo com o número de espiras.

Para 20 espiras em anel no primário, se tem o seguinte gráfico que está mostrado na Figura 4.5.

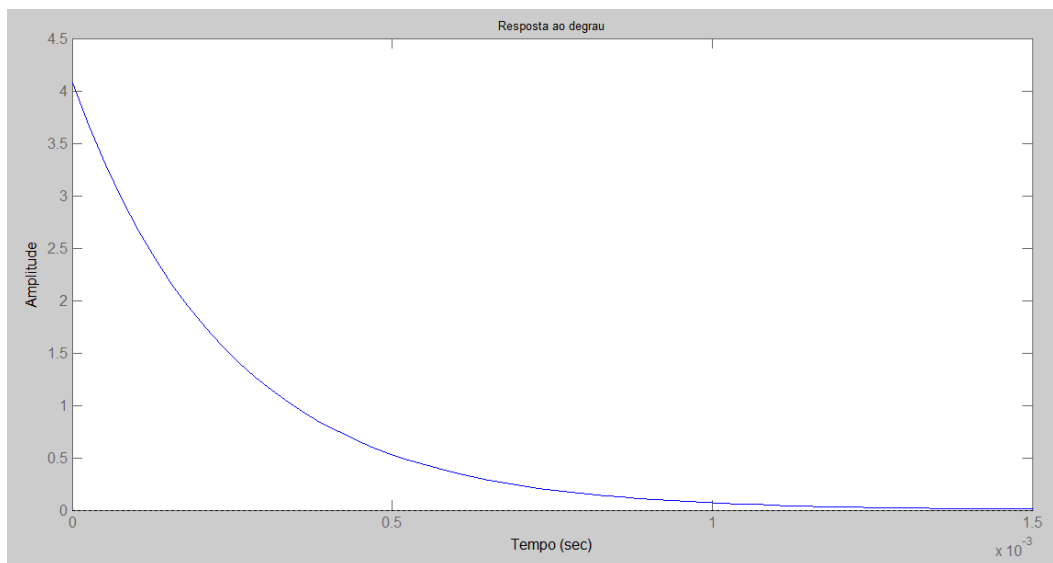


Figura 4.5 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Nesse caso, vê-se que, na prática o valor da resistência do transformador com $n=20$ diminui, com isso demora-se mais para atingir o equilíbrio do sistema quando se compara com os gráficos anteriores.

Para 30 espiras no primário do transformador em anel e 50 espiras em disco no secundário do mesmo a Figura 4.6 apresenta a resposta do sistema para esse número de espiras.

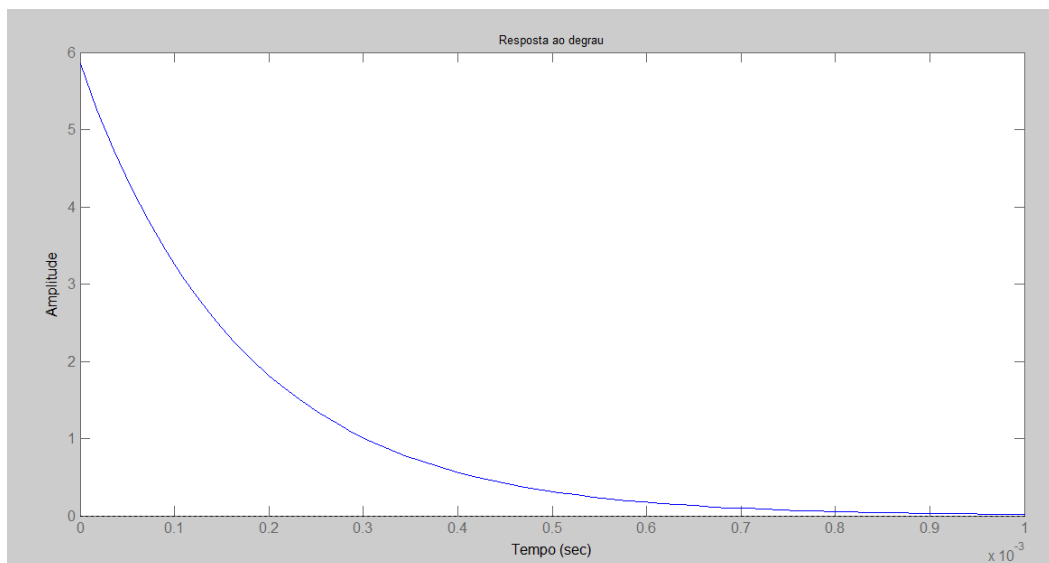


Figura 4.6 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Como é de se esperar com aumento da resistência, o equilíbrio da resposta ao degrau é atingida mais rapidamente.

Na Figura 4.7 é apresentada a resposta para 50 espiras no primário na configuração em anel do transformador tendo no seu secundário 50 espiras na configuração de disco.

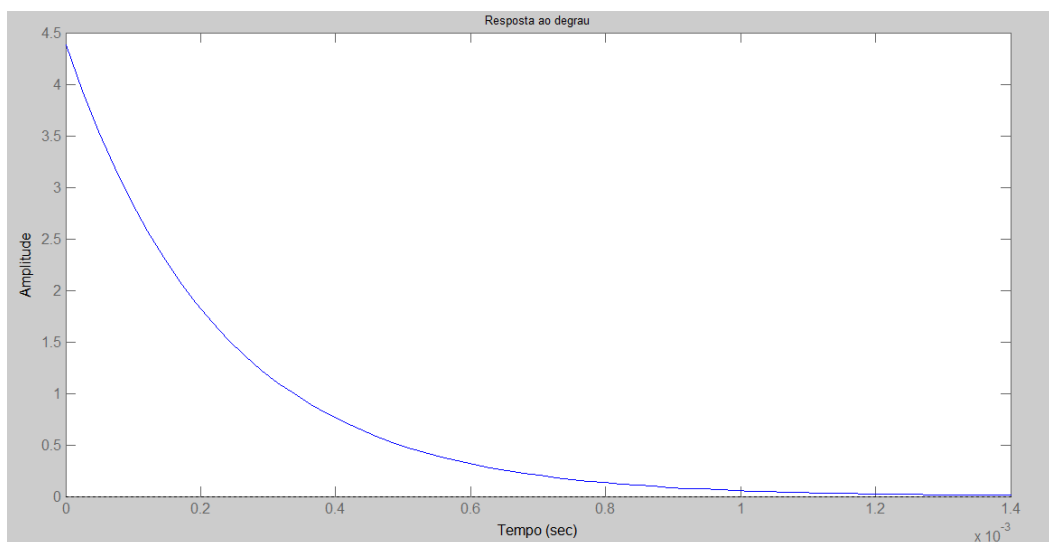


Figura 4.7 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para 200 espiras em disco no secundário e 50 espiras em anel no primário a Figura 4.8 representa tal resposta.

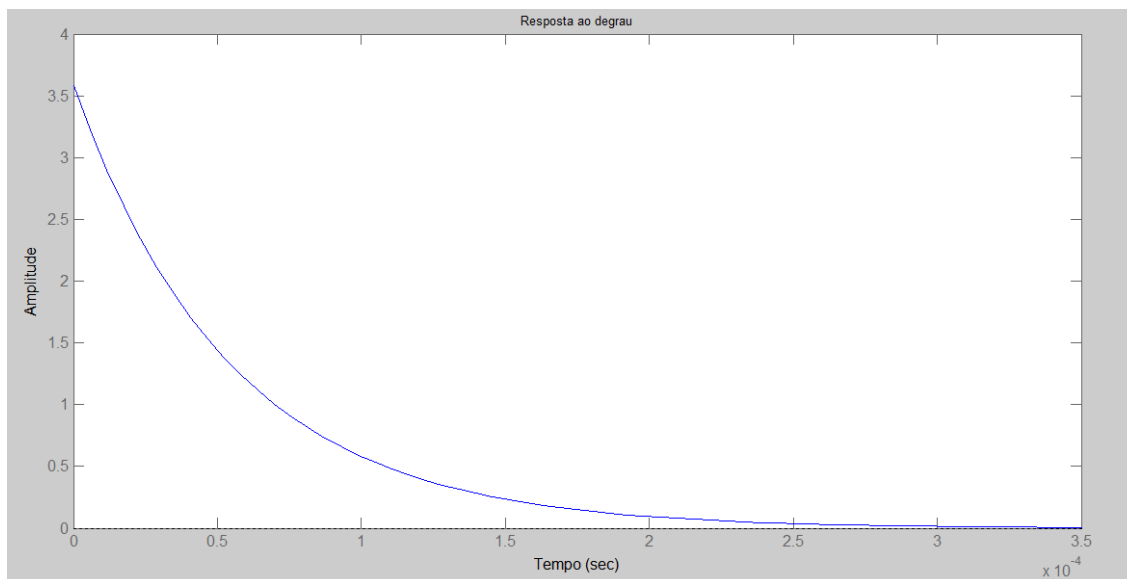


Figura 4.8 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 1 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.

Como se pode concluir através das Figuras 4.2 até a 4.8, para esse modelo proposto as respostas são praticamente as mesmas, o que leva a crer que tal modelo é muito simples para uma representação matemática apropriada do transformador de bobinas planas.

4.4.2 Diagrama de Bode

Nessa etapa do trabalho, obteve-se o diagrama de bode para diferentes números de espiras ($n= 2, 7, 15, 20, 30$ e 50) no primário do transformador na configuração em anel e 50 espiras no secundário do mesmo na configuração em disco, para a primeira configuração do circuito equivalente. Essa resposta em frequência tem como entrada uma senóide.

Para $n=2$ espiras no primário do transformador na configuração em anel, tem-se a seguinte resposta do diagrama de Bode:

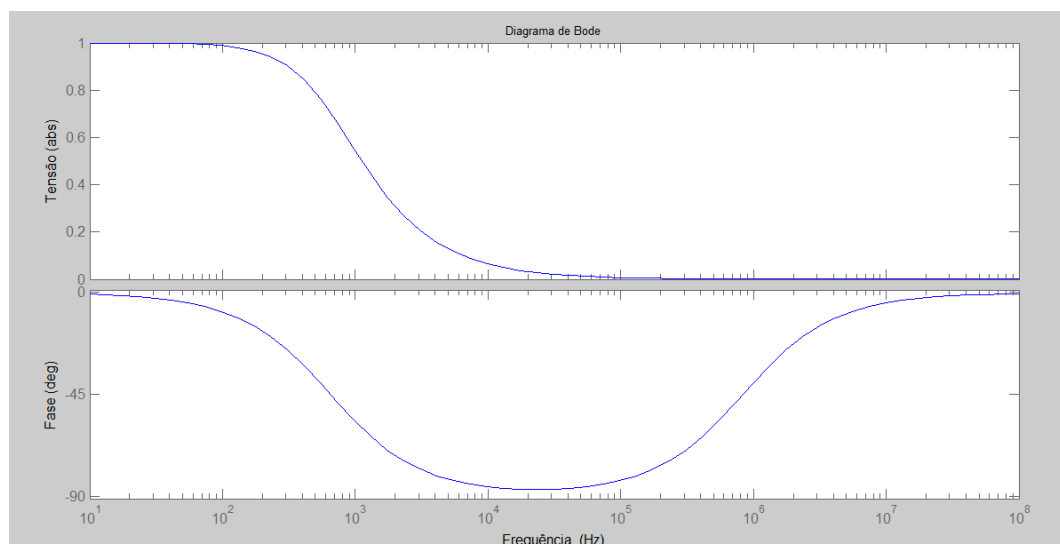


Figura 4.9 Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para essa resposta do circuito na frequência, espera-se encontrar um pico na magnitude da resposta, onde esse pico irá representar a frequência de ressonância do circuito. Por esse gráfico podemos ver que a ordem de **1000** representa a frequência de corte do circuito.

Para $n=7$ espiras no primário em anel, mantendo o secundário em disco com 50 espiras, se têm o seguinte diagrama de Bode:

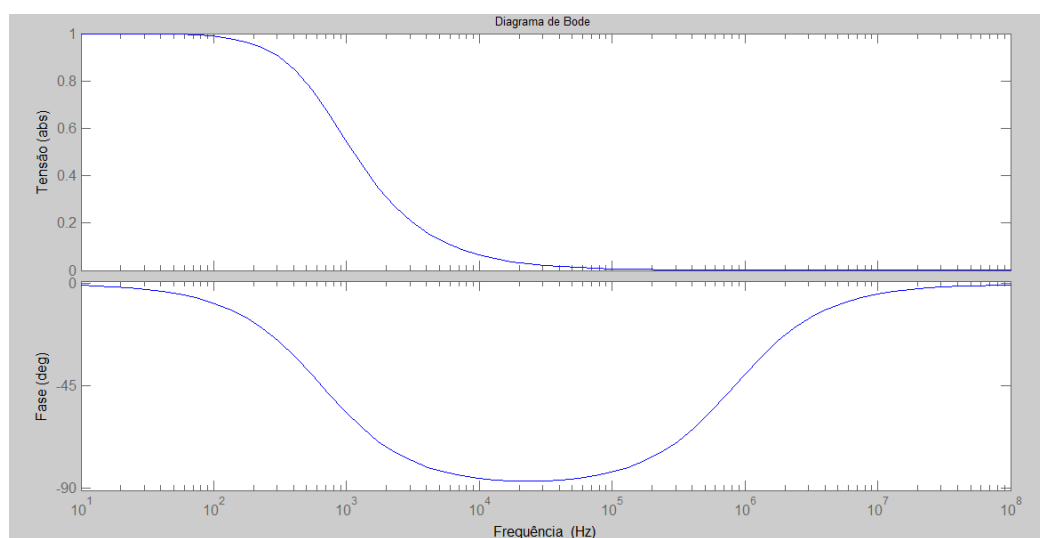


Figura 4.10 Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Nessa resposta com $n=7$ espiras, vê-se que a frequência de corte é praticamente 1000 o que não muda muito quando se compara com o $n=2$ espiras.

Para $n=15$:

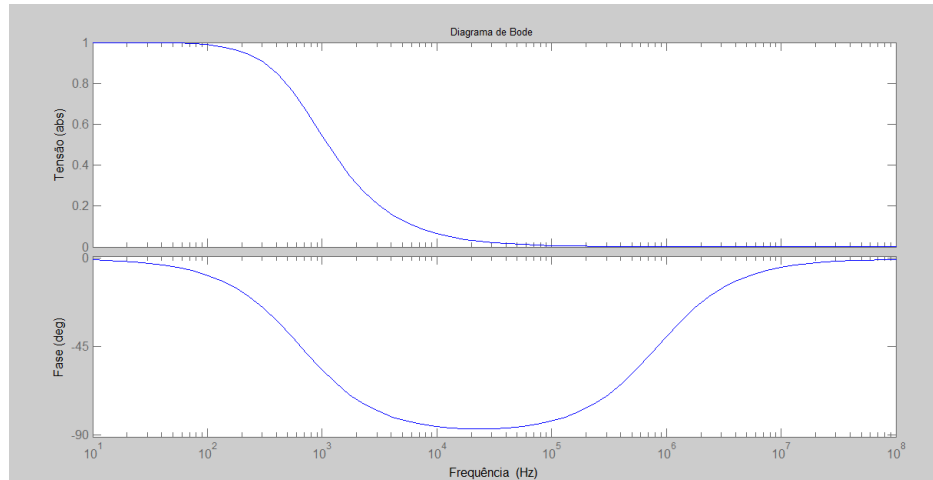


Figura 4.11 Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Com $n=15$ espiras apresentam-se uma diminuição na frequência de corte do circuito fazendo com que haja uma tendência para com que a reta tenha apenas uma inclinação.

A Figura 4.12 mostra a resposta com $n=20$.

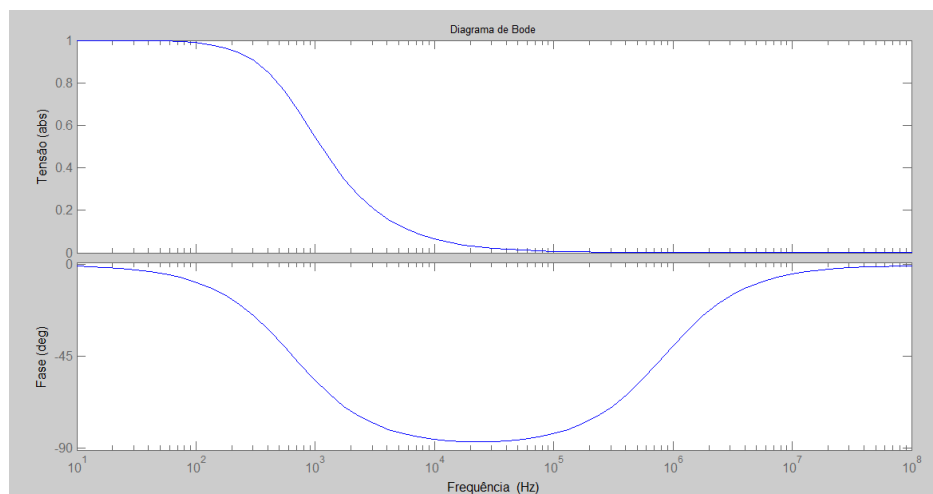


Figura 4.12 Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

A tendência de decrescimento da frequência de corte vai se confirmando com o aumento do número de espiras de acordo com as Figuras 4.9 até 4.12.

Com $n=30$ está representado na Figura 4.13.

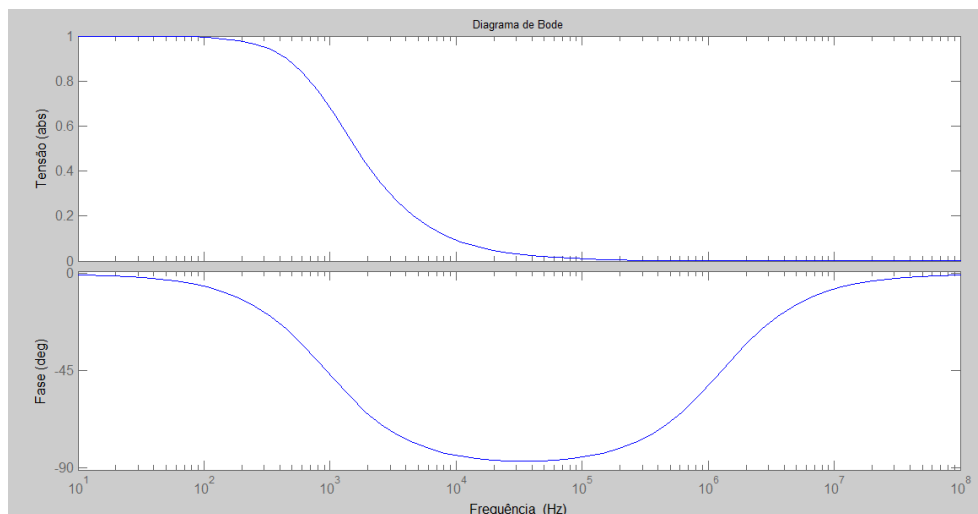


Figura 4.13 Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Com o aumento do número de espiras há um aumento na suavidade da curva após a frequência de corte.

Para $n=50$ está mostrado na Figura 4.14:

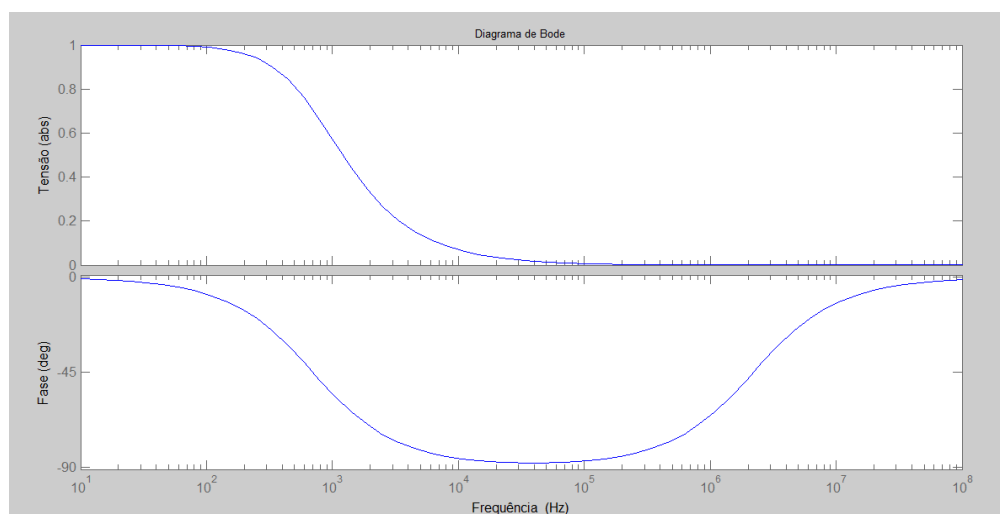


Figura 4.14 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

A mudança do parâmetro n (número de espiras) influencia na mudança dos elementos passivos que compõe o circuito, sendo assim alterando a resposta em frequência do circuito.

Na Figura 4.15 é visto um gráfico onde se representa a comparação entre os diagramas de Bode para diferentes números de espiras para o mesmo circuito equivalente.

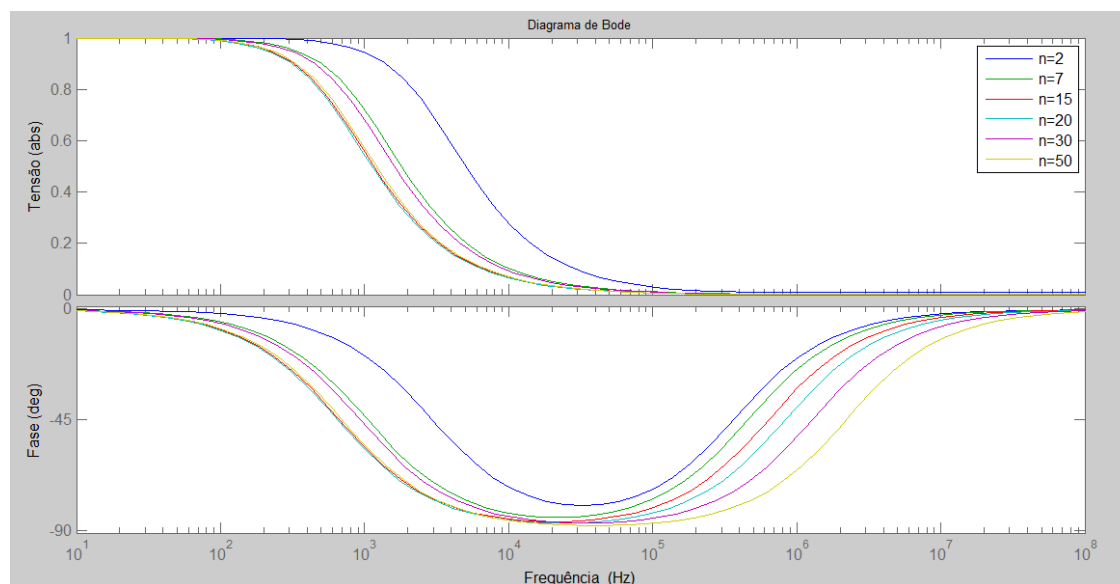


Figura 4.15 Comparação entre cada curva para diferentes números de espiras.

Ao analisar o gráfico da Figura 4.15 é possível perceber que com aumento da resistência devido ao aumento do número de espiras, a curva tende a um deslocamento para baixo (*offset*), apresentando também uma menor acomodação em magnitude e em fase, que diminui com o aumento do número de espiras.

4.5 SIMULAÇÕES PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.

No Capítulo 2 na Figura 2.3, temos a segunda configuração para o circuito equivalente, onde essa consideração é um pouco mais complexa que a primeira configuração, onde além de apresentar resistências e indutâncias para a representação do primário e secundário do transformador de bobinas planas e um indutor para representar o acoplamento entre o primário e secundário, indutância mútua, apresenta uma capacitância em paralelo com o conjunto indutor - resistência de acordo com a Figura 4.16.

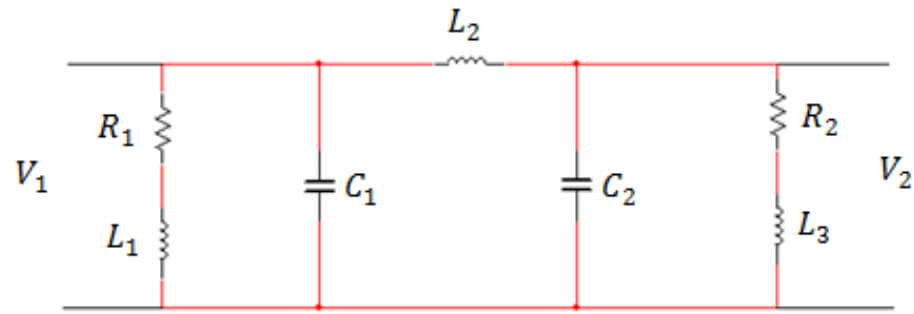


Figura 4.16 Esquema do circuito equivalente analisado.

Desenvolvendo a função de transferência para esse circuito se tem:

Fazendo o equivalente em série de $R_1 + L_1$ que está em paralelo com C_1 .

$$Z_{equ1} = \left(R_1 + \frac{sL_1}{1 + \frac{s^2 L_1^2}{R_1^2}} \right) \quad (4.8)$$

Portanto,

$$Z_{equ1} = \frac{(R_1 + sL_1) \times \left(\frac{1}{sC_1} \right)}{(R_1 + sL_1) + \left(\frac{1}{sC_1} \right)} \quad (4.9)$$

$$Z_{equ1} = \frac{R_1 + sL_1}{s^2 L_1 C_1 + s R_1 C_1 + 1} \quad (4.10)$$

De forma análoga pode-se fazer o equivalente em série de $R_2 + L_3$ que está em paralelo com C_2 , ficando:

$$Z_{equ2} = \frac{R_2 + sL_3}{s^2 L_3 C_2 + s R_2 C_2 + 1} \quad (4.11)$$

Tendo

$$Z_{equ3} = sL_2 \quad (4.12)$$

Logo se pode reduzir o circuito a seguinte forma:

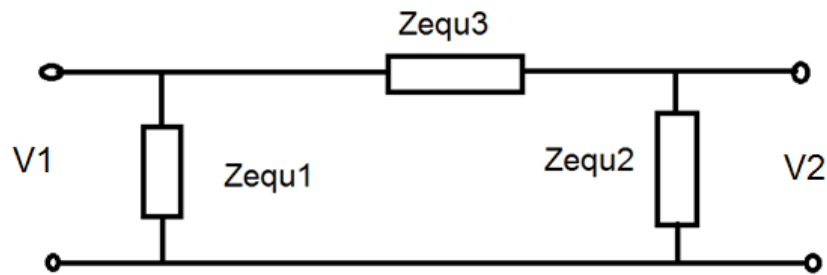


Figura 4.17 Circuito equivalente para essa configuração

Por divisão de tensão se tem:

$$V_2 = \frac{Z_{\text{equ2}} V_1}{Z_{\text{equ2}} + Z_{\text{equ3}}} \quad (4.13)$$

Em que

$$Z_{\text{equ2}} = \frac{R_2 + sL_2}{s^2 L_2 C_2 + sR_2 C_2 + 1} \quad (4.14)$$

$$Z_{\text{equ3}} = sL_2 \quad (4.15)$$

Logo,

$$G(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2 + sL_2}{s^2 L_2 L_1 C_2 + s^2 R_2 C_2 L_2 + s(L_1 + L_2) + R_1} \quad (4.16)$$

Com essa função de transferência (4.16) do circuito equivalente, é possível obter respostas no MATLAB no secundário do transformador (V_2) para uma determinada entrada no primário (V_1).

4.5.1 Resposta ao degrau

Para a segunda alternativa do modelo do transformador, tem-se a segunda configuração como está representada na Figura 4.18, que apresenta a seguinte resposta com $n=2$ espiras no primário na configuração em anel com o secundário tendo 50 espiras na configuração em disco. A entrada no primário é um degrau, sendo as Figuras obtidas para a resposta na saída do secundário do transformador.

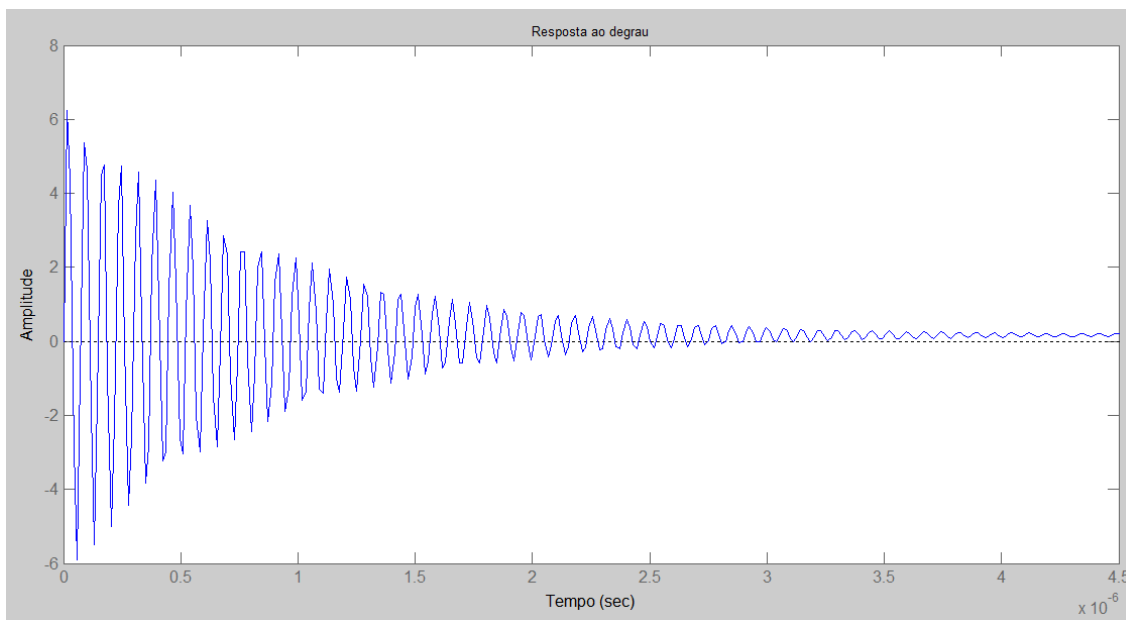


Figura 4.18 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A Figura 4.19 mostra a resposta desse circuito quando se aumenta o número de espiras para sete ($n=7$) no primário mantendo o mesmo transformador, ou seja, no primário está em anel e no secundário em disco com 50 espiras.

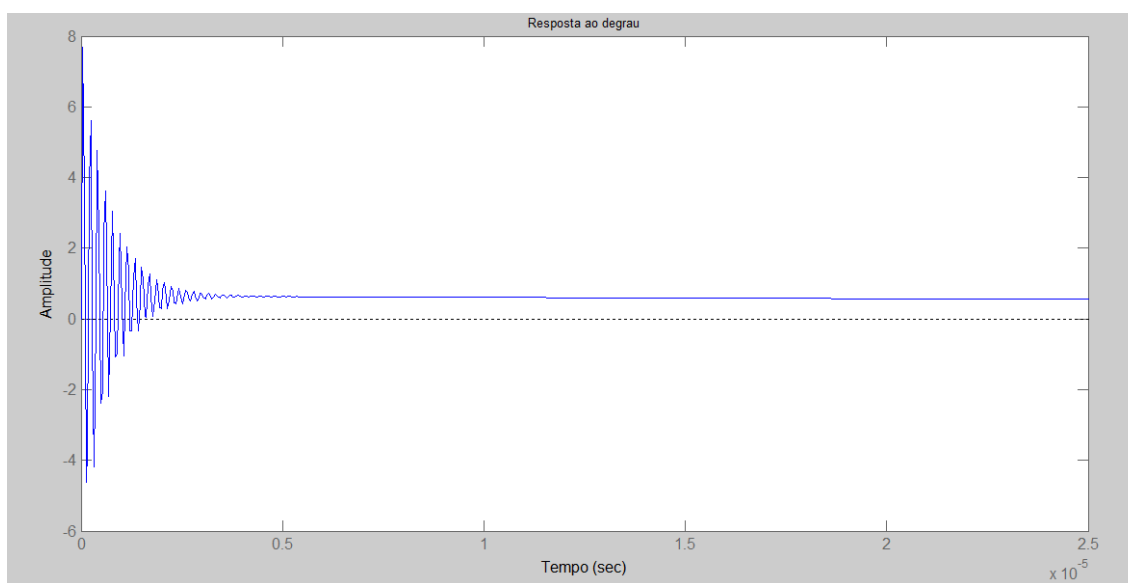


Figura 4.19 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=15$ espiras no primário do transformador, com a configuração em anel, se tem o seguinte gráfico:

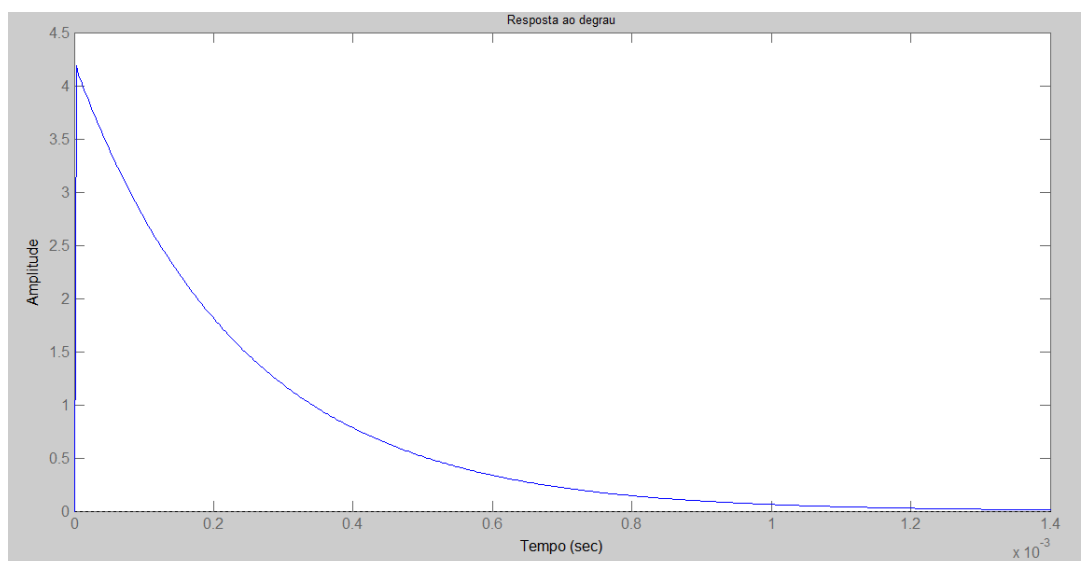


Figura 4.20 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A resposta vai ficando diferente quando se aumenta o número de espiras para esse modelo.

A Figura 4.21 tem a seguinte resposta para $n=20$ espiras em anel no primário.

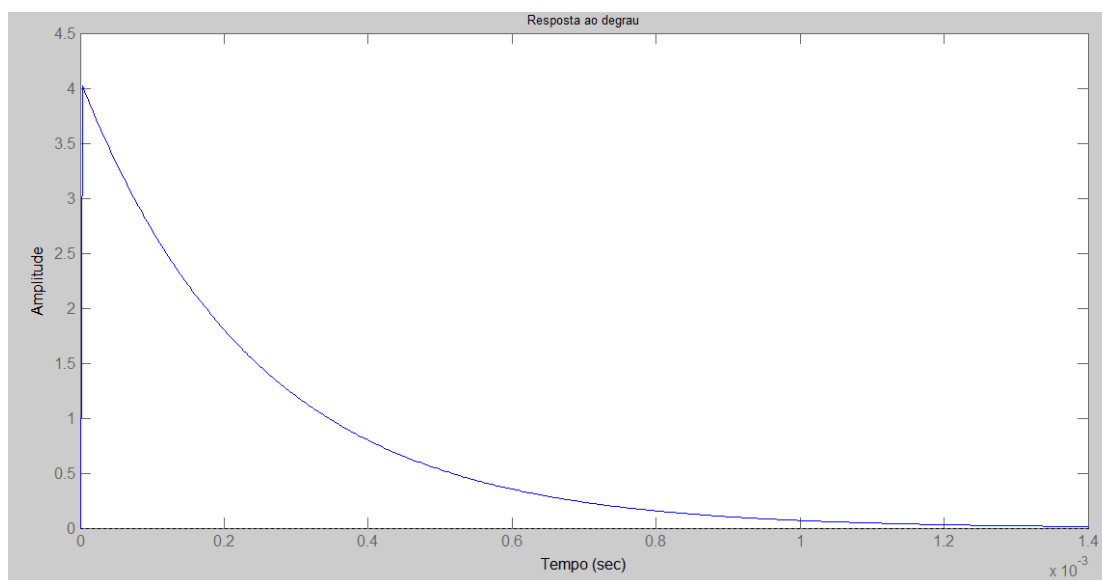


Figura 4.21 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A Figura 4.22 representa a seguinte resposta para $n=30$ espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

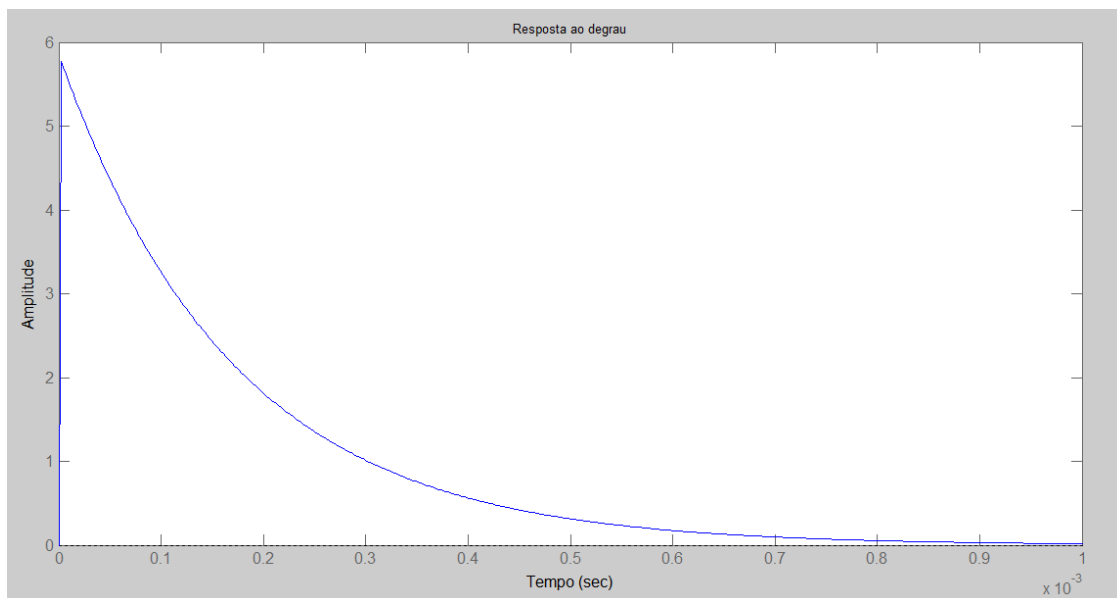


Figura 4.22 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Na Figura 4.23 temos a resposta do sistema para $n= 50$ espiras no primário em anel.

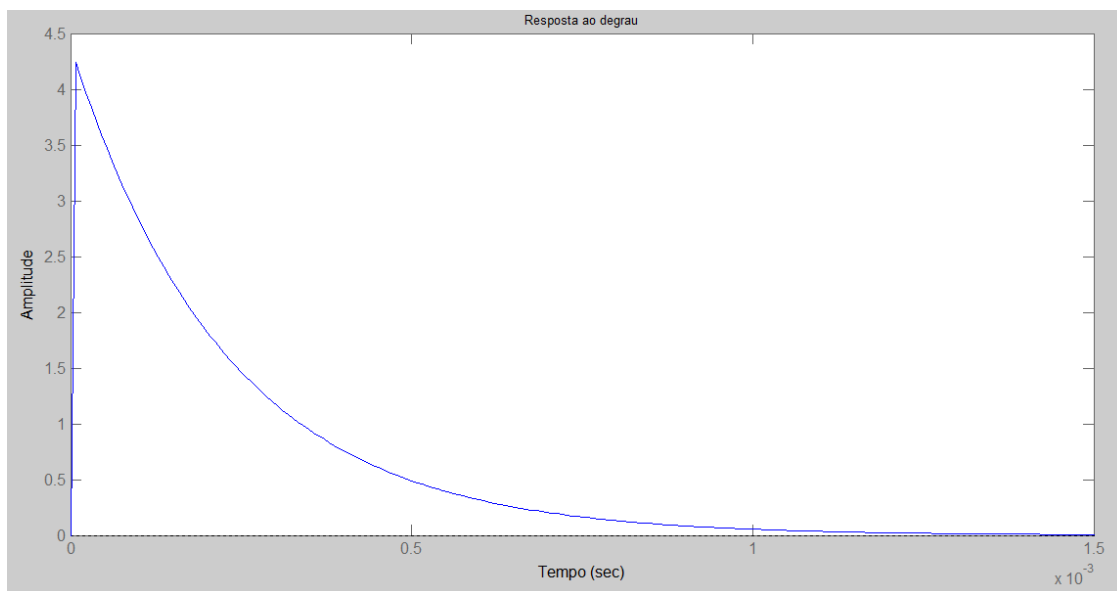


Figura 4.23 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n = 200$ espiras no secundário em disco e 50 espiras no primário em anel:

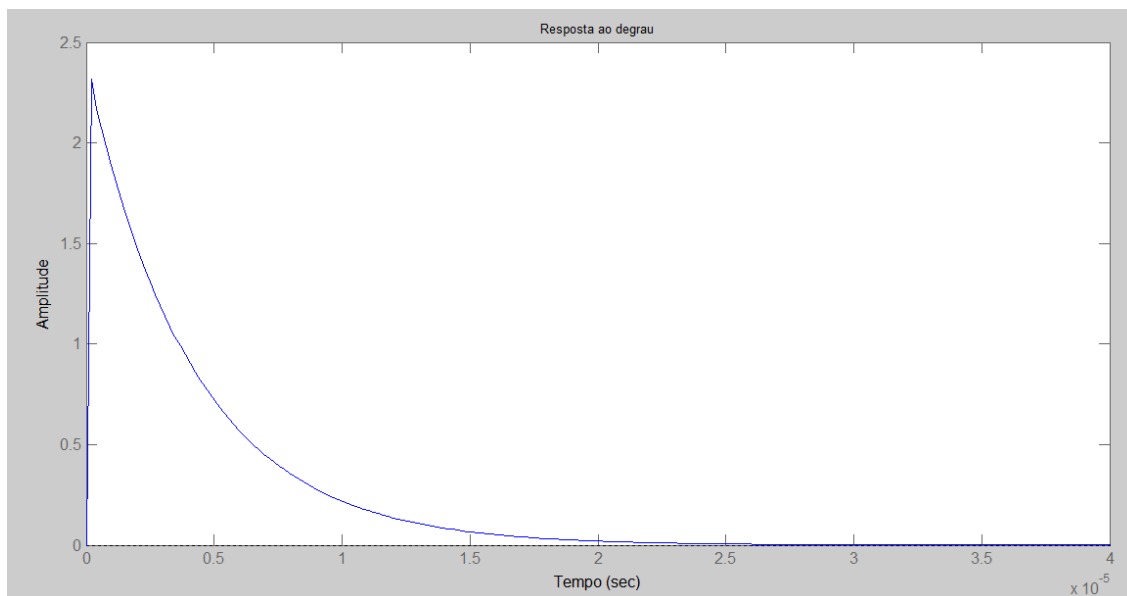


Figura 4.24 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 2 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.

Ao analisar os gráficos das Figuras 4.18 até 4.24, vê-se que as respostas para $n=2$ espiras e $n=7$ espiras seguem o mesmo formato de resposta, porém ao aumentar o número de espiras no primário a resposta apresenta outro formato sem oscilações (de $n=15$ até $n=200$ espiras). Com isso, vê-se que esse modelo falha na representação do transformador de bobinas planas em altas frequências para diferentes números de espiras no primário do mesmo.

4.5.2 Diagrama de Bode

Obtendo o diagrama de bode para a segunda configuração, usando diferentes números de espiras ($n=2, 7, 15, 20, 30$ e 50) no primário do transformador na configuração em anel e 50 espiras no primário do mesmo na configuração em disco. Essa resposta em frequência tem uma onda senoidal como entrada.

Para $n=2$ espiras no primário na configuração em anel:

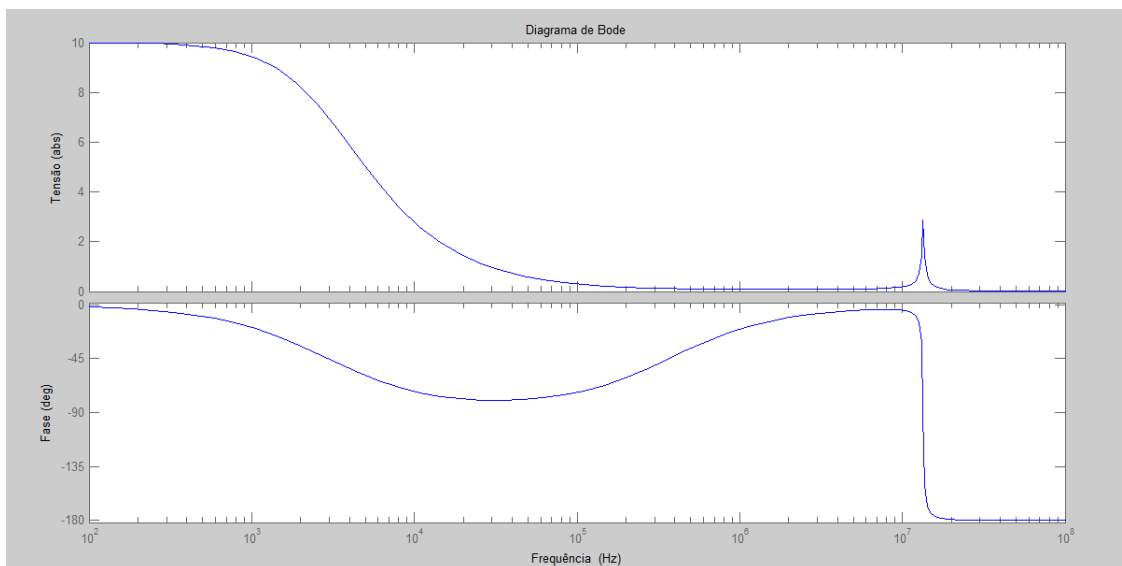


Figura 4.25 Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

O que se pode ver com esse diagrama de magnitude é que o pico representa a frequência de ressonância do circuito.

Na Figura 4.26, há a representação para $n=7$ espiras no primário do transformador, tendo 50 espiras no secundário na configuração em disco.

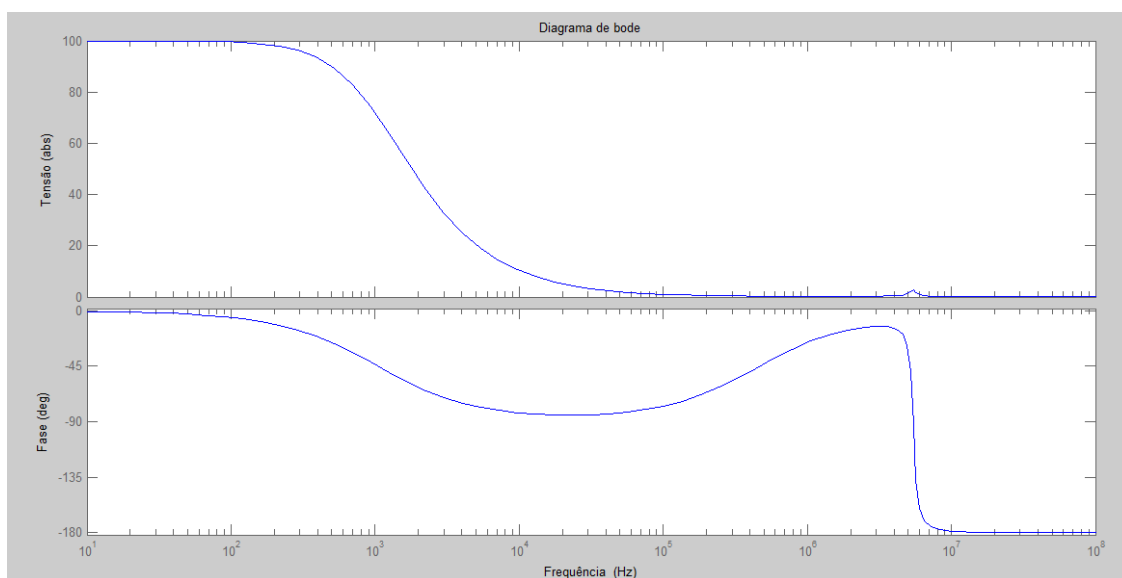


Figura 4.26 Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Com o aumento da resistência, vê-se uma atenuação da resposta em frequência na magnitude e fase.

Para $n=15$ espiras no primário do transformador, tem-se:

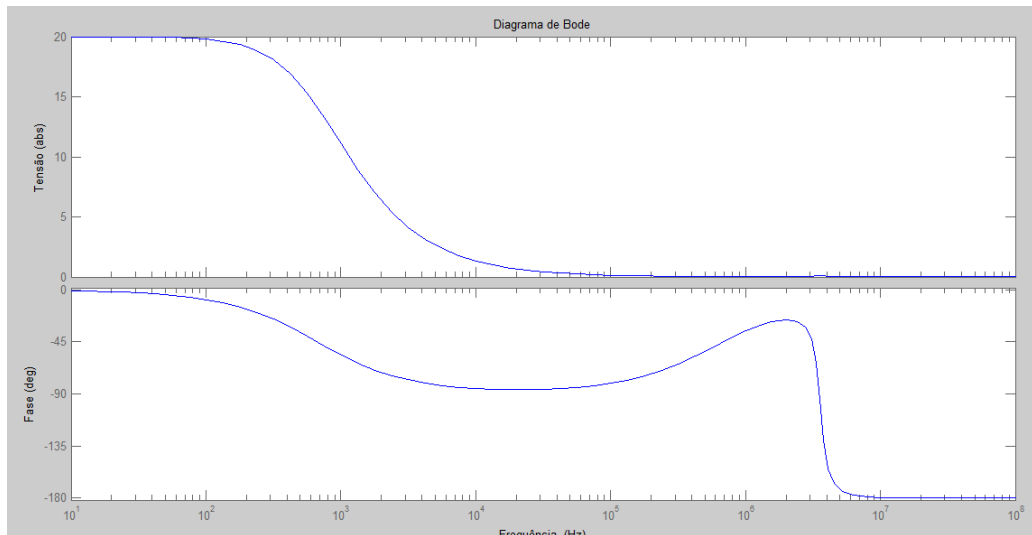


Figura 4.27 Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

E como visto anteriormente, a resistência vai aumentando a atenuação da resposta em frequência.

Com $n=20$ espiras, encontra-se o diagrama de Bode mostrado na Figura 4.28.

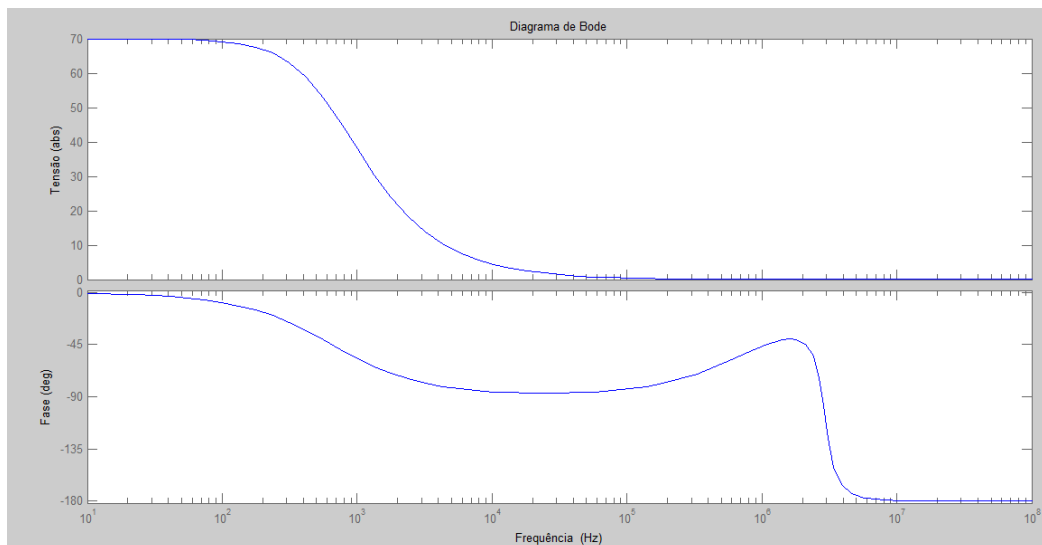


Figura 4.28 Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=30$ espiras no primário do transformador na configuração em anel e tendo 50 espiras no secundário na configuração em disco, tem-se:

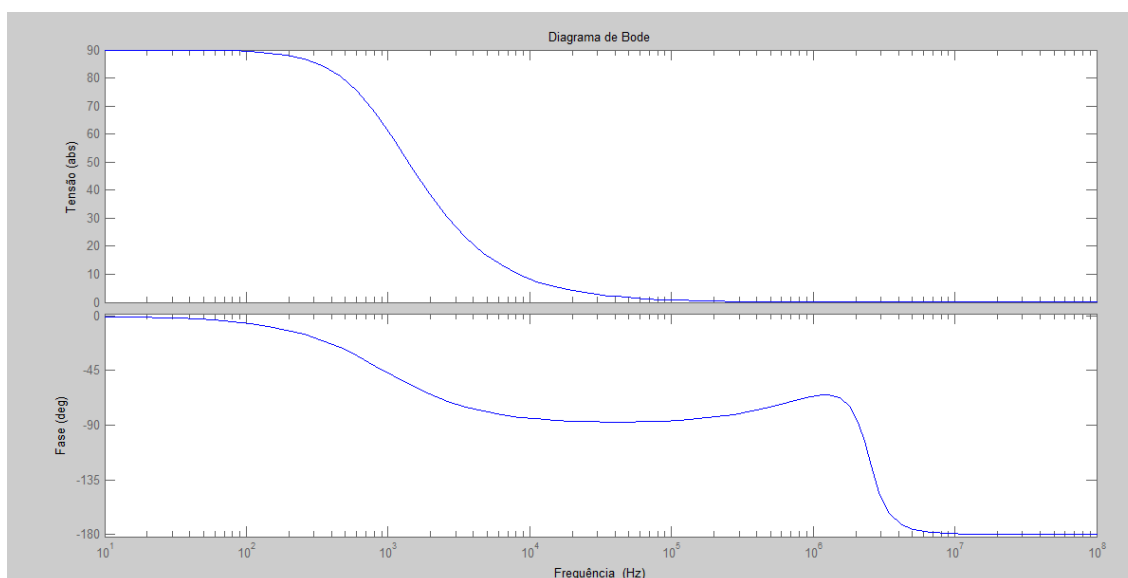


Figura 4.29 Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

A partir da Figura 4.29 vemos que a atenuação é realmente notável ao ponto de transformar um pico em uma reta, praticamente.

Para $n=50$ vê-se a seguinte resposta:

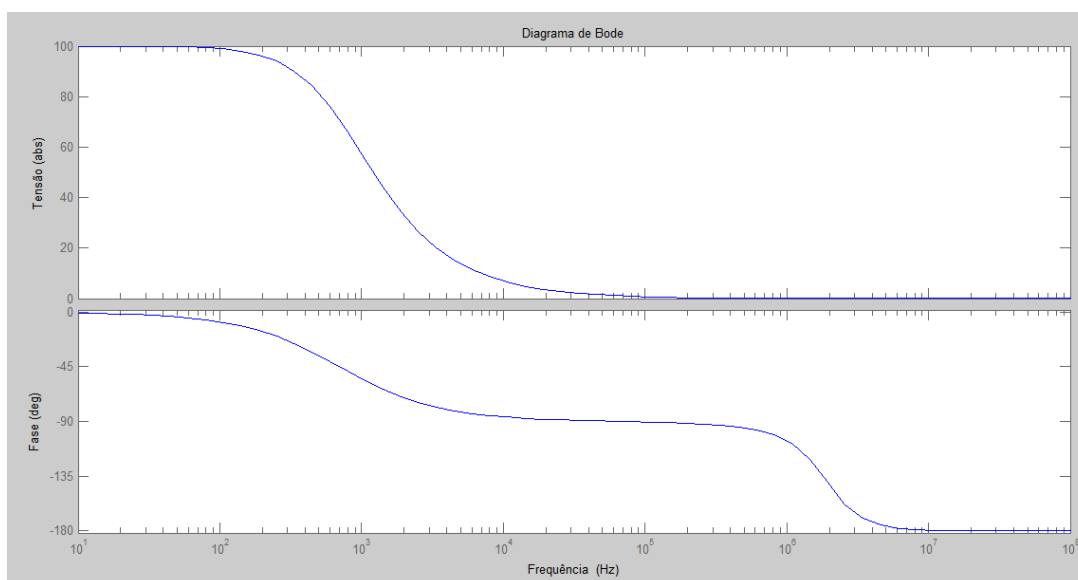


Figura 4.30 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Aqui a resposta se torna mais suave, devido ao aumento da resistência.

Tem-se a seguinte resposta do sistema para $n=200$ espiras no secundário na configuração em disco do transformador e 50 espiras no primário do mesmo, porém com a configuração em anel:

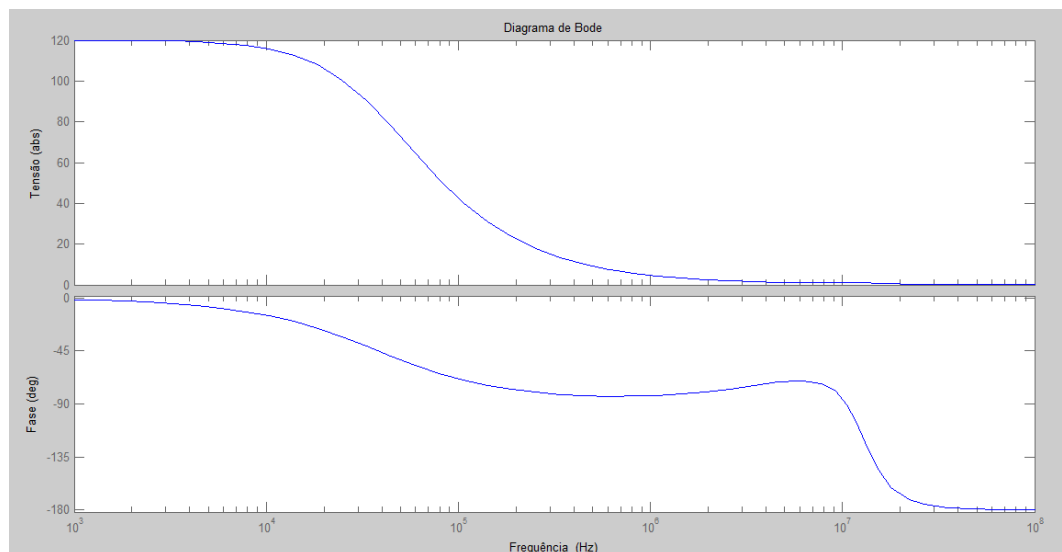


Figura 4.31 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.

Na Figura 4.32 há a comparação entre os diagramas de bode para diferentes números de espiras para o mesmo circuito equivalente.

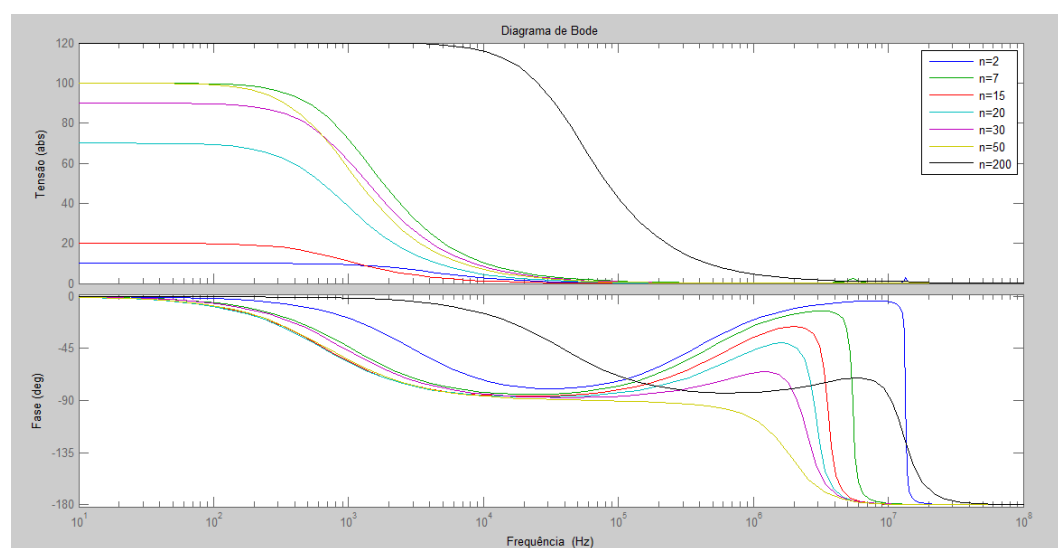


Figura 4.32 Comparação entre cada curva para diferentes números de espiras.

É possível concluir que, com o aumento da resistência do circuito que é consequência do aumento do número de espiras, a resposta em frequência do transformador sofre atenuação, tendendo a zero com o aumento da impedância resistiva.

4.6 SIMULAÇÕES PARA A TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.

Como foi apresentado no Capítulo 3 para a terceira configuração do circuito equivalente se tem a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{s^2 L_2 C_4 R_2 + s L_2 + R_2}{s^4 L_2 C_4 C_2 R_2 L_2 + s^3 L_2 (L_2 C_2 + L_2 C_4) + s^2 (L_2 C_4 R_2 + L_2 R_2 C_2) + s (L_2 + L_2) + R_2} \quad (4.17)$$

Através dessa função, encontraram-se as respostas computacionais para essa configuração.

4.6.1 Resposta ao degrau

Para a terceira alternativa do modelo do transformador, tem-se a terceira configuração, tendo como a sua função de transferência a Equação 4.17. Para a configuração do transformador assumido para realizar os experimentos computacionais considerou-se 50 espiras no secundário do transformador na configuração em disco e variou-se o número de espiras no primário, todavia fixou a configuração em anel do primário e a do secundário em disco do transformador.

Para $n=2$ espiras no primário do transformador em anel se têm a seguinte resposta:

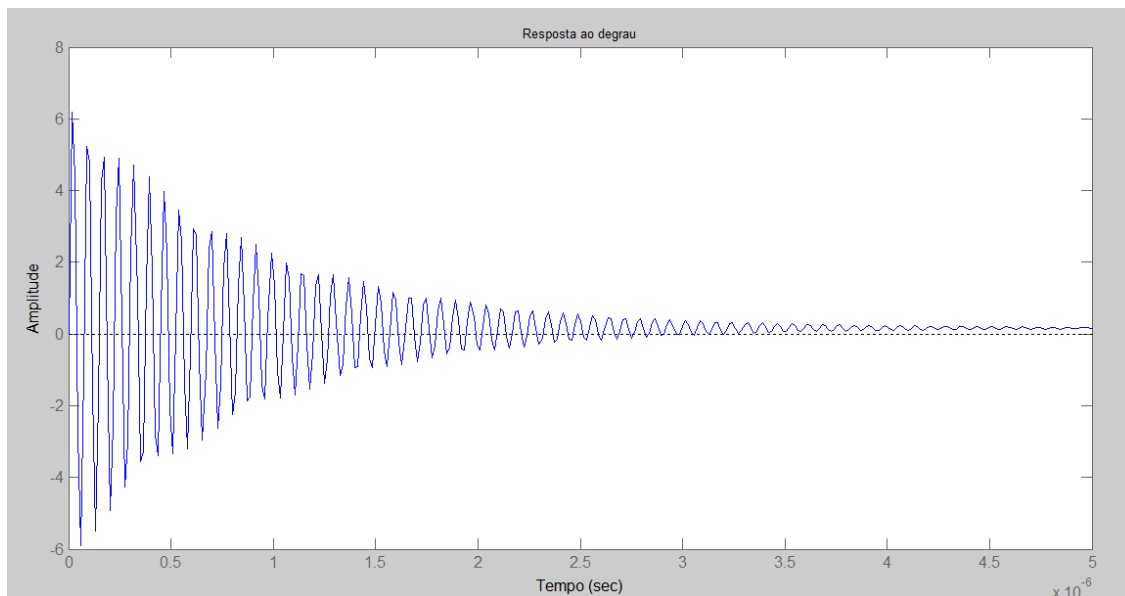


Figura 4.33 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=7$ espiras tem-se:

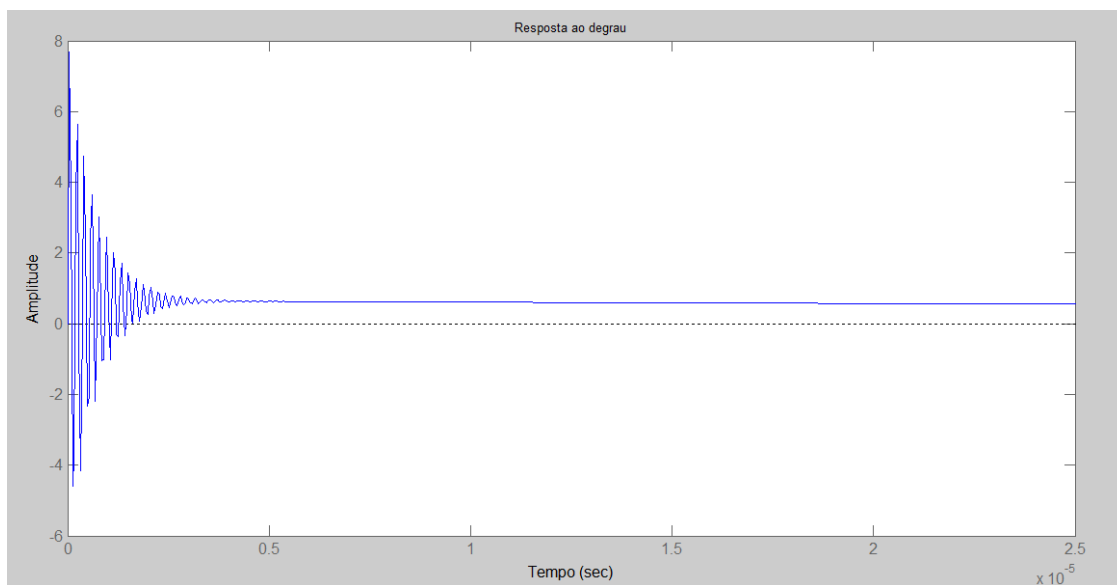


Figura 4.34 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A Figura 4.35 mostra a resposta para $n=15$.

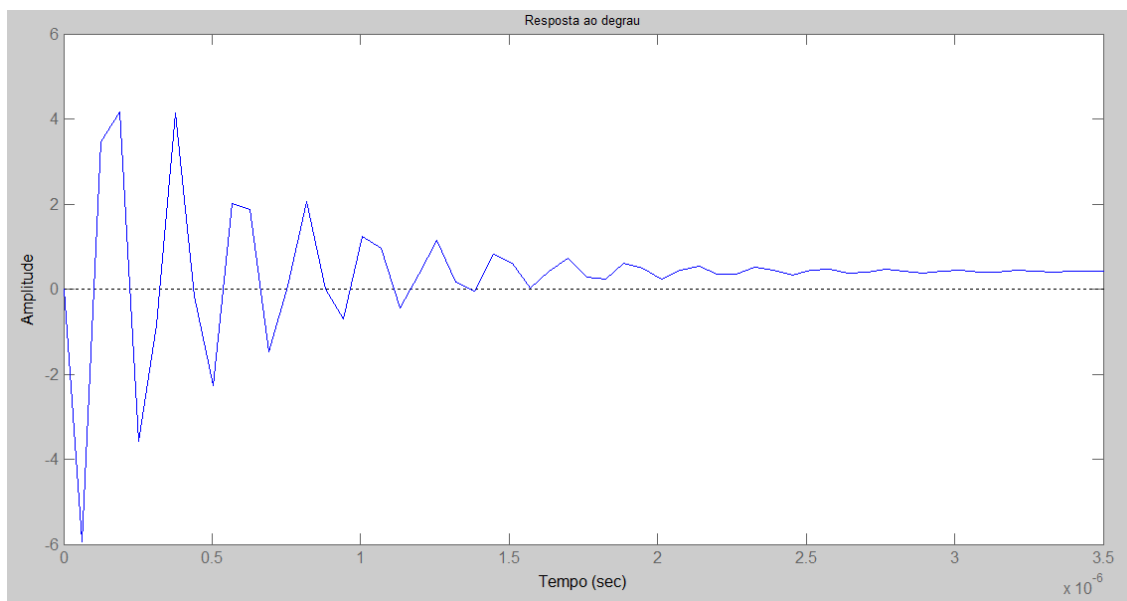


Figura 4.35 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=20$ espiras é representado na Figura 4.36.

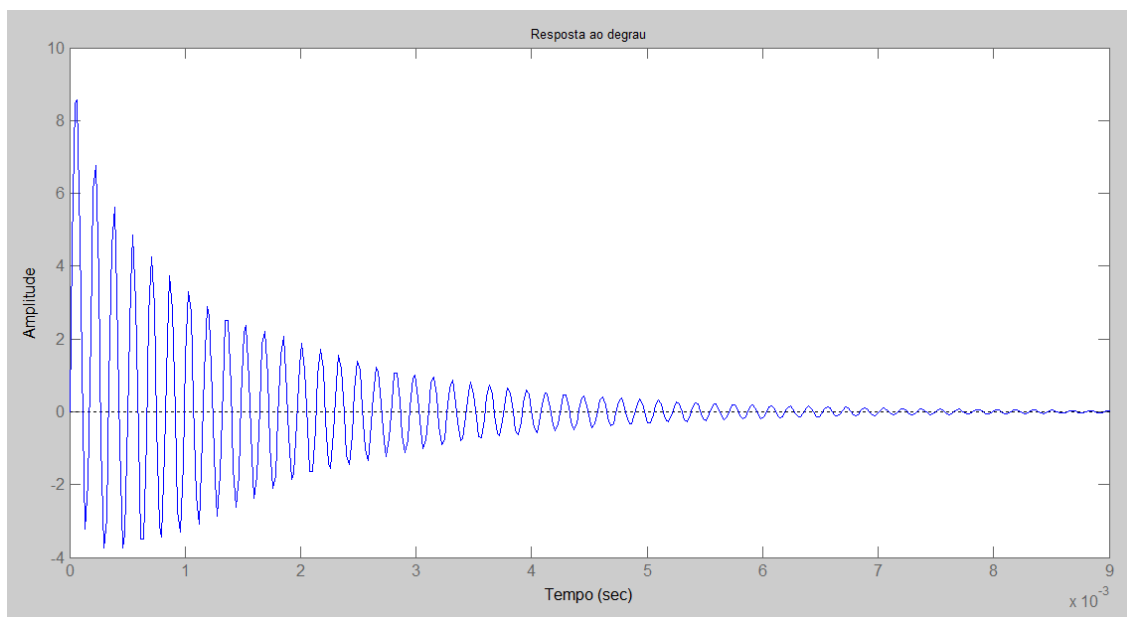


Figura 4.36 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=30$ tem-se:

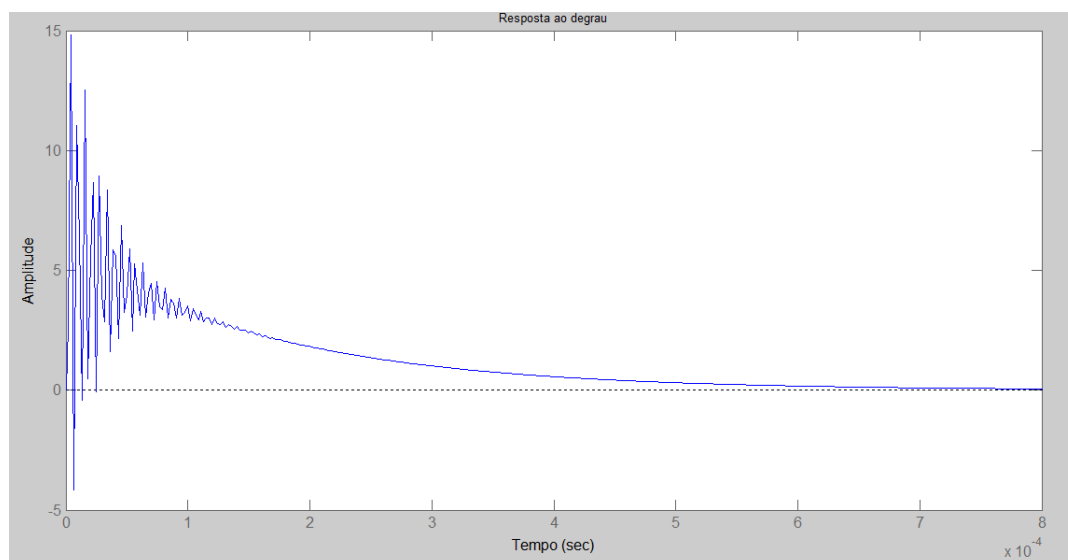


Figura 4.37 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

O aumento do número das bobinas naturalmente aumenta-se a resistência com o aumento do número espiras que formam as bobinas.

Com $n=50$ a resposta fica da seguinte forma:

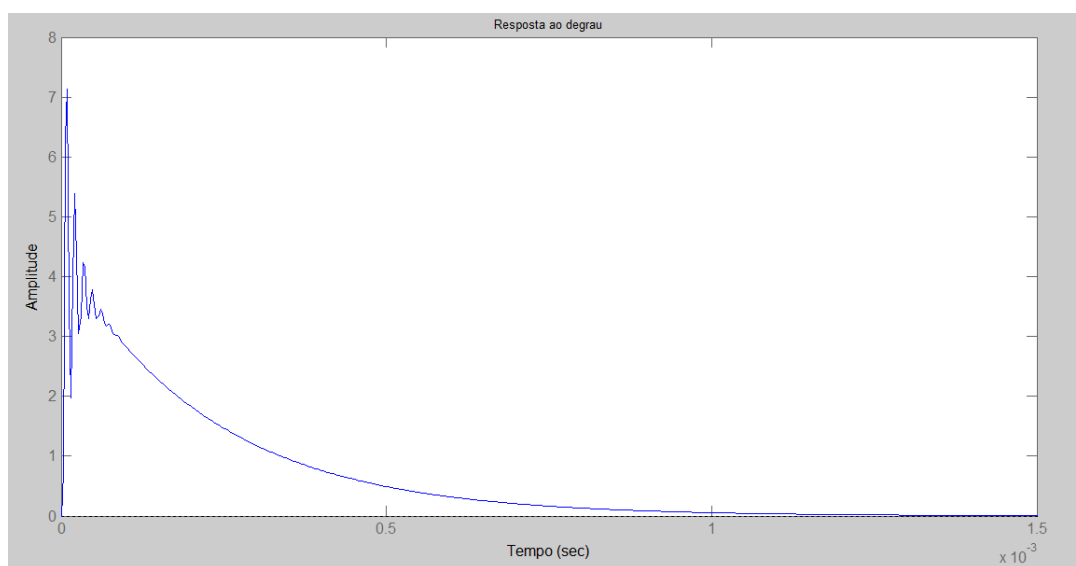


Figura 4.38 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Finalizando a resposta da terceira configuração com resposta ao degrau, para $n=200$ se tem:

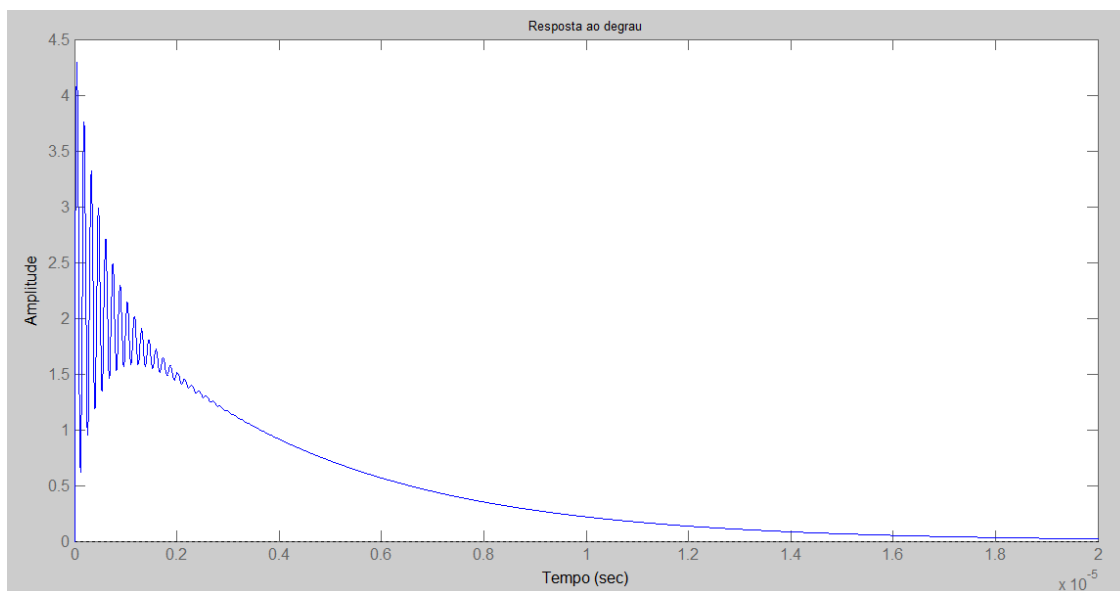


Figura 4.39 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 3 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.

O resultado do sistema tendo como entrada no primário um degrau para diferentes números de espiras apresenta uma característica interessante, pois com o aumento da resistência, o tempo de resposta aumenta, tendo como exceção $n=200$, pois nessa configuração deve existir uma compensação provocada pelos outros componentes passivos (indutor e capacitor) para esse número de espiras.

4.6.2 Diagrama de Bode

Obteve-se também a resposta em frequência para a terceira configuração proposta do circuito equivalente. Essa resposta em frequência é para uma entrada senoidal. O transformador está com seu primário em anel variando o número de espiras de 2 a 50 espiras e fixando o secundário com 50 espiras na configuração em disco.

Para $n=2$ espiras no primário do transformador em anel:

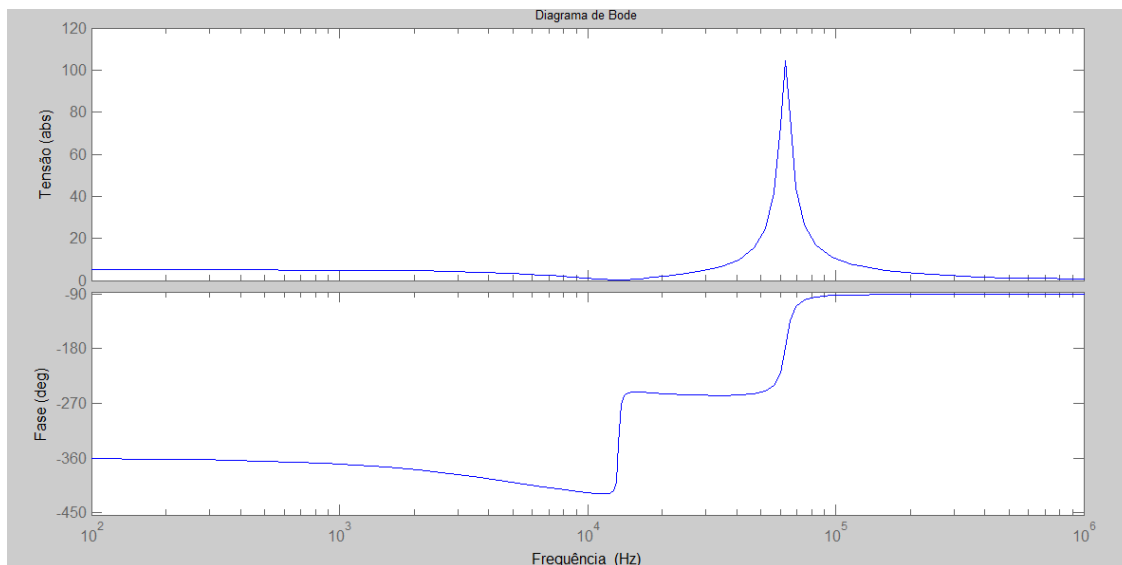


Figura 4.40 Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Novamente temos na resposta em frequência um pico na magnitude, o que indica uma possível frequência de ressonância do circuito equivalente. É o que será verificado na prática, como será apresentado adiante.

Para $n=7$ espiras no primário em anel tem-se:

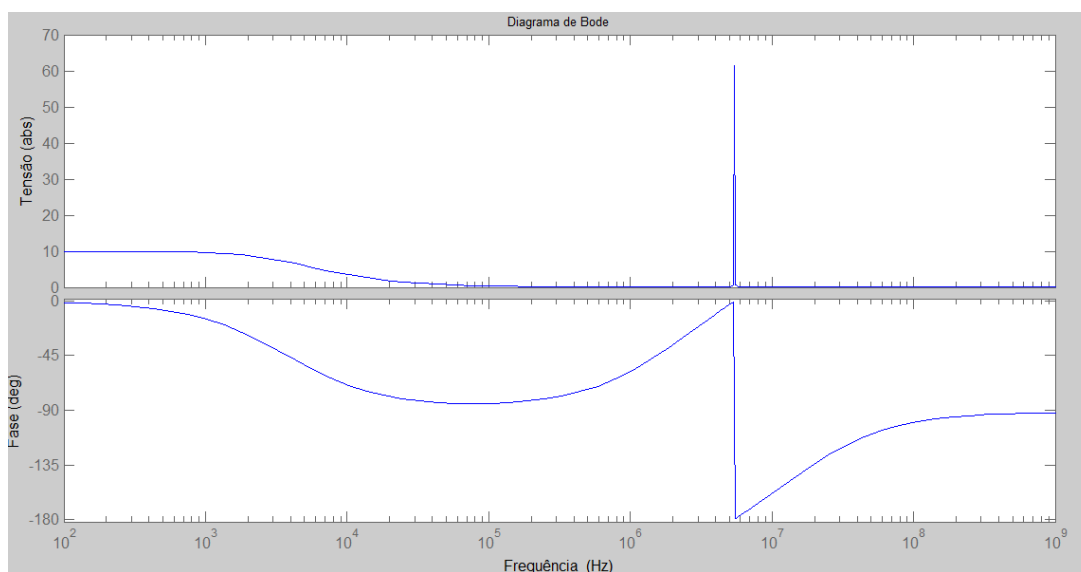


Figura 4.41 Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Mais uma vez a atenuação da resposta em frequência vem sendo notada com o aumento da resistência.

Resposta para $n=15$ espiras:

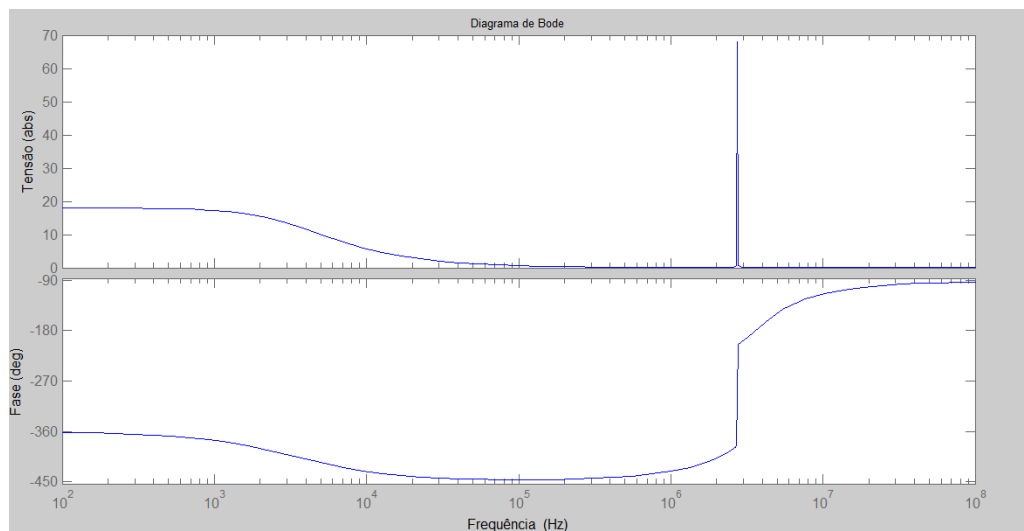


Figura 4.42 Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Nota-se o aumento da intensidade da atenuação quando se compara o gráfico da Figura 4.42 com as Figuras 4.40 e 4.41.

Para $n=20$ espiras.

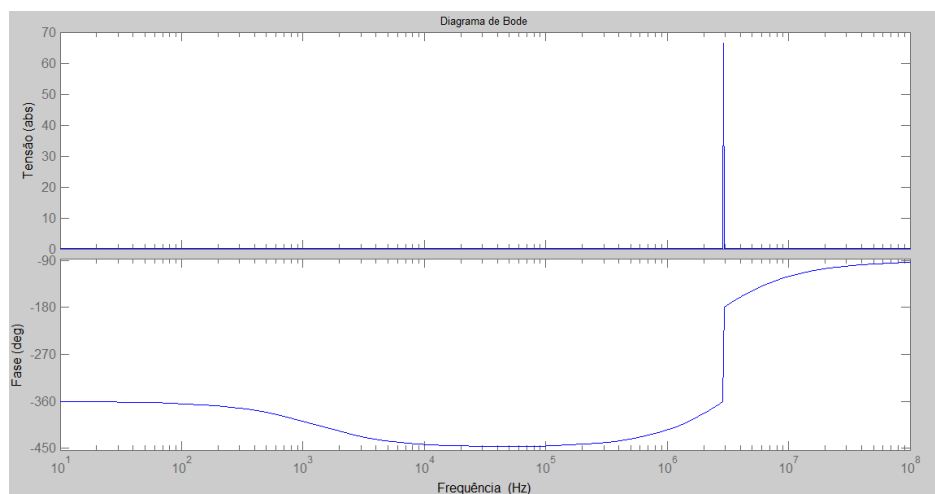


Figura 4.43 Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

No gráfico mostrado na Figura 4.44 apresenta a resposta para $n=30$.

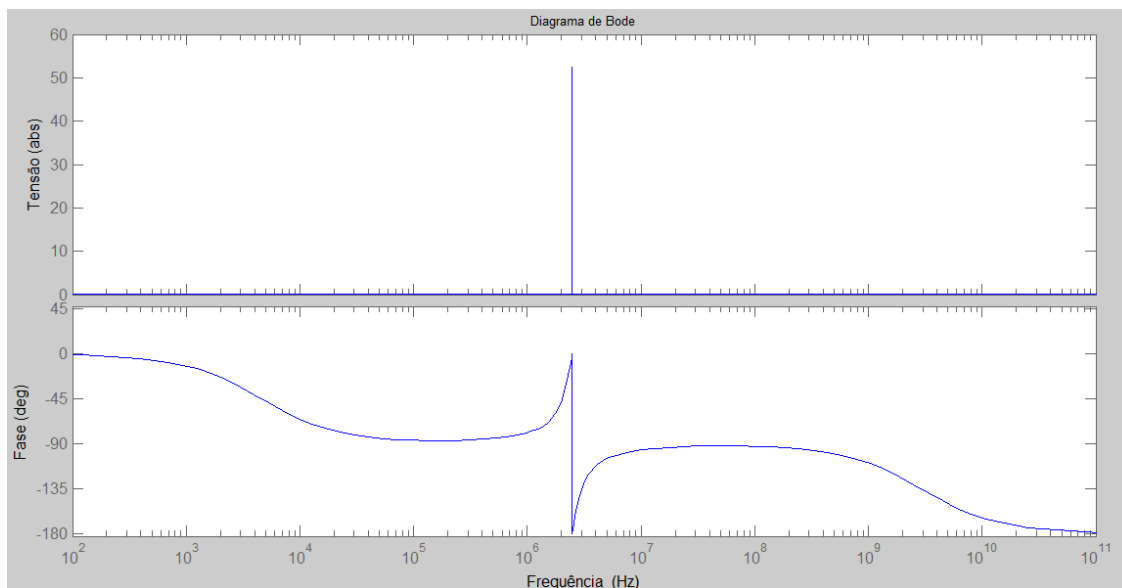


Figura 4.44 Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=50$ espiras:

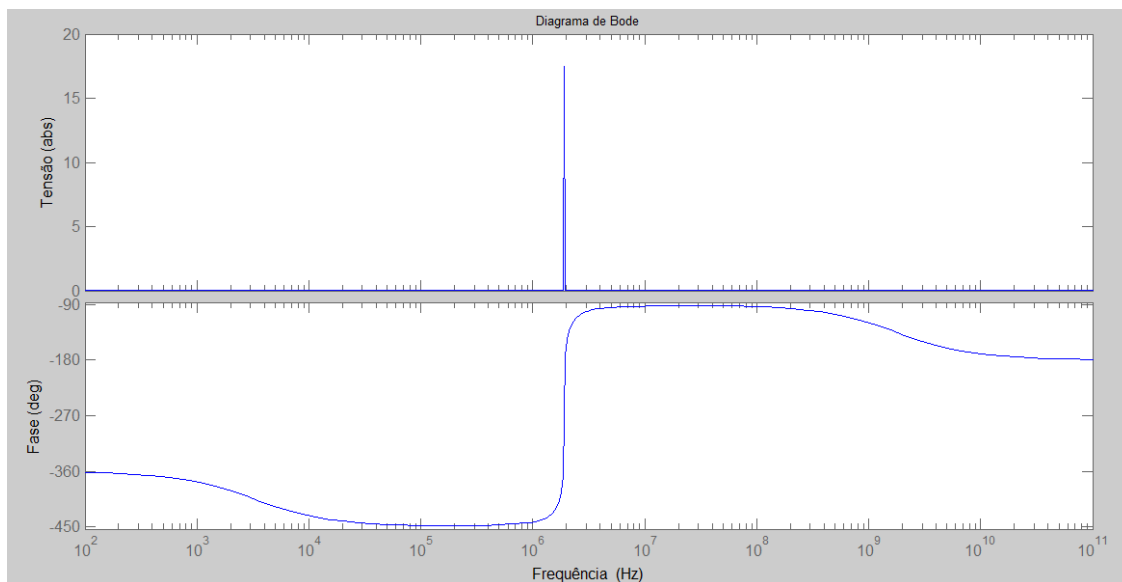


Figura 4.45 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

E por último, para $n=200$ espiras no secundário do transformador em disco, tendo no primário 50 espiras na configuração em anel.

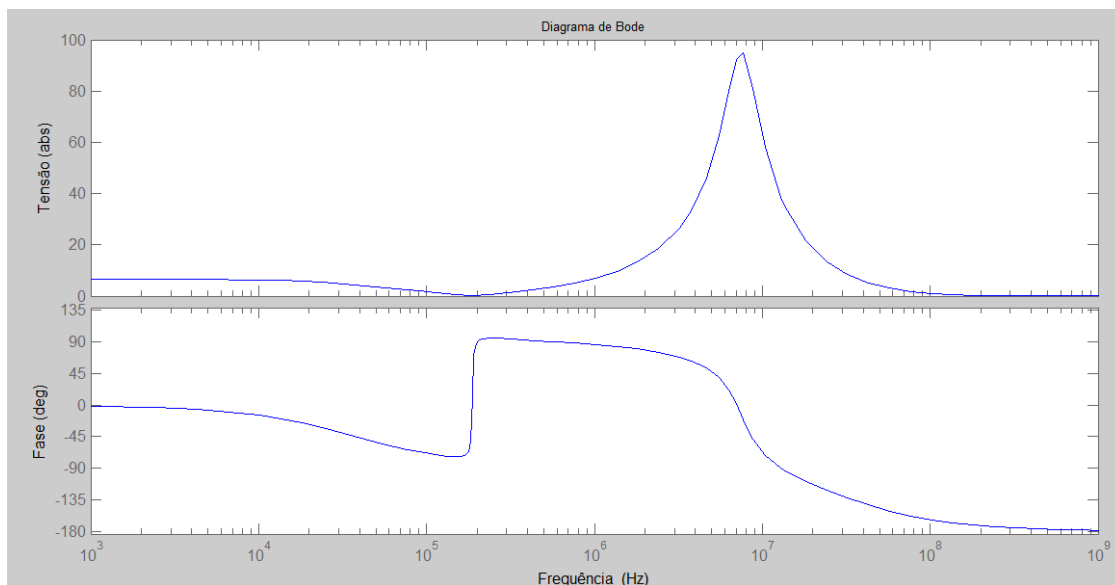


Figura 4.46 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.

Na Figura 4.47 há a comparação entre os diagramas de bode para diferentes números de bobinas para o mesmo circuito equivalente.

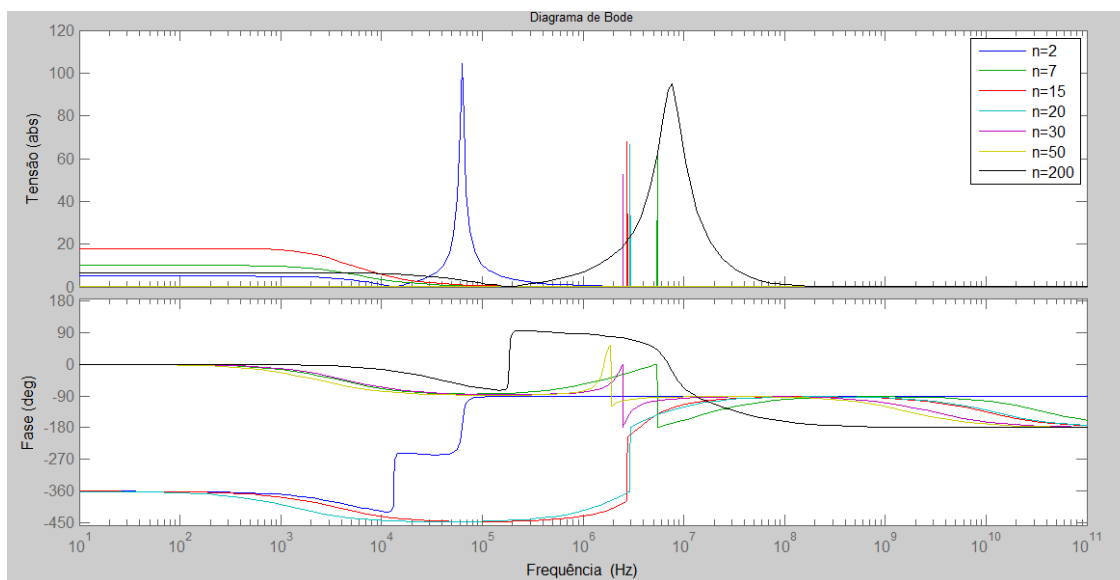


Figura 4.47 Comparação entre os Diagramas de Bode.

Mais uma vez, fez-se uma comparação entre as respostas em frequência para diferentes números de espiras aonde o aumento da resistência vem a atenuar o sinal. A próxima seção apresentará a última configuração proposta para o circuito equivalente na tentativa de encontrar uma representação para o transformador de bobinas planas.

4.7 SIMULAÇÕES PARA A QUARTA CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE.

Também no Capítulo 3, encontrou-se a função de transferência para a quarta configuração do circuito equivalente, onde se pode representá-la da seguinte forma:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{z_5 s^4 + z_4 s^3 + z_3 s^2 + z_2 s + z_1}{p_5 s^4 + p_4 s^3 + p_3 s^2 + p_2 s + p_1} \quad (4.10)$$

Em que:

- $z_5 = L_2 C_1 R_2 L_2 C_3;$
- $z_4 = L_3 L_2 C_5;$
- $z_3 = L_2 C_3 R_2 + L_3 C_4 R_2;$
- $z_2 = L_3;$
- $z_1 = R_2;$
- $p_5 = L_2 C_3 L_2 C_4 R_2 + L_2 L_3 C_4 C_2 R_2;$
- $p_4 = L_2 C_3 L_3 + L_2 L_3 C_2 + L_2 L_3 C_4;$
- $p_3 = L_2 C_3 R_2 + L_3 C_4 R_2 + L_2 R_2 C_2;$
- $p_2 = L_3 + L_2;$
- $p_1 = R_2.$

Usando essa Equação (4.18), encontram-se as respostas computacionais para esse circuito com o uso do MATLAB.

4.7.1 Resposta ao degrau

Para a quarta alternativa do modelo do transformador, temos a quarta configuração, tendo como a sua função de transferência a Equação (4.18). Considerando no secundário do transformador 50 espiras na configuração em disco e variando o número de espiras do primário, mas mantendo-se a configuração em anel.

Para $n=2$ espiras no primário em anel, tem-se a seguinte resposta:

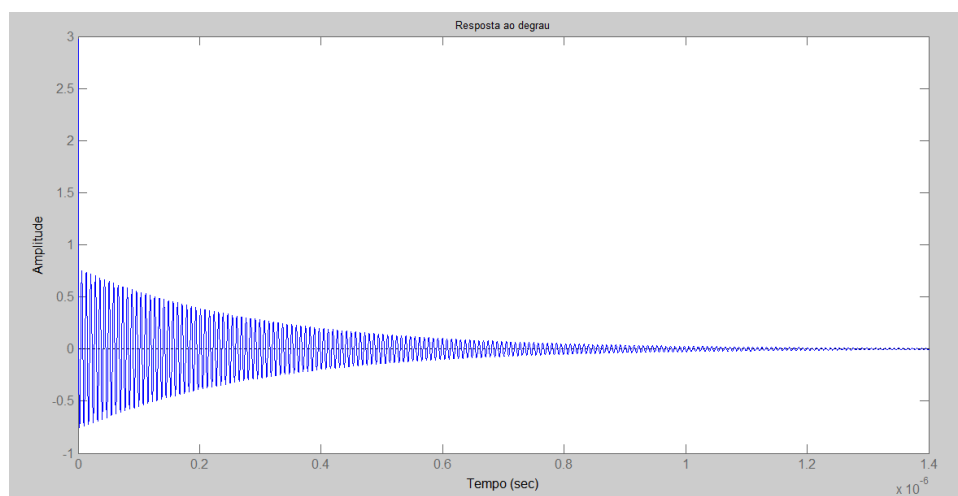


Figura 4.48 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 2 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=7$ espiras no secundário em anel.

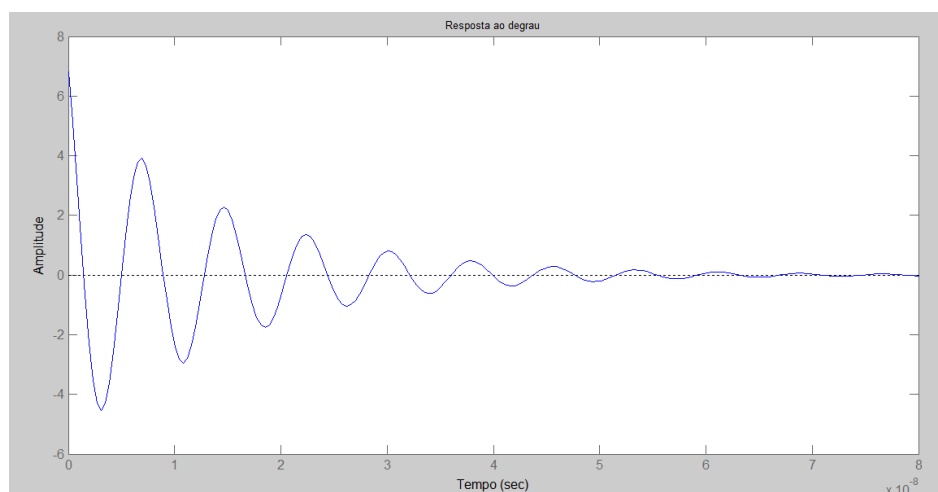


Figura 4.49 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 7 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=15$ espiras no primário em anel:

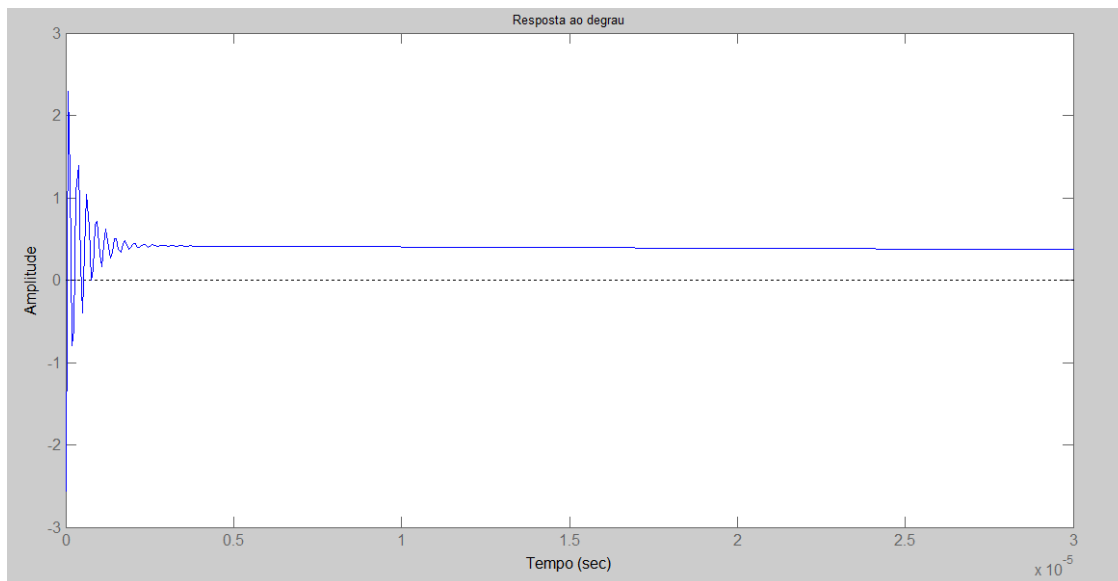


Figura 4.50 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 15 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Para $n=20$ se tem a seguinte resposta:

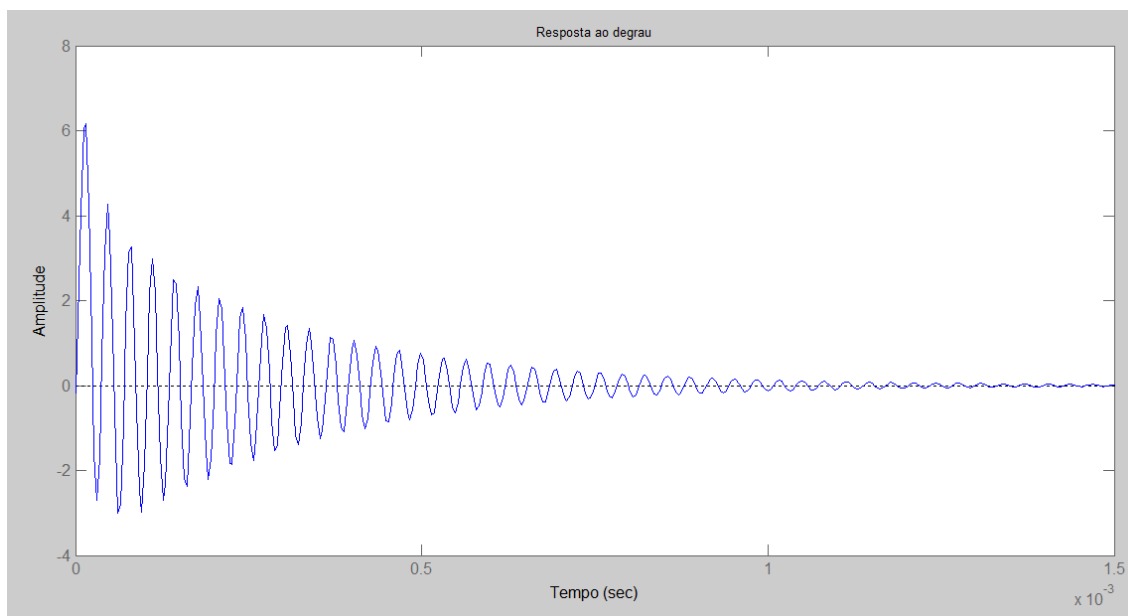


Figura 4.51 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 20 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

A Figura 4.52 representa a resposta para $n=30$.

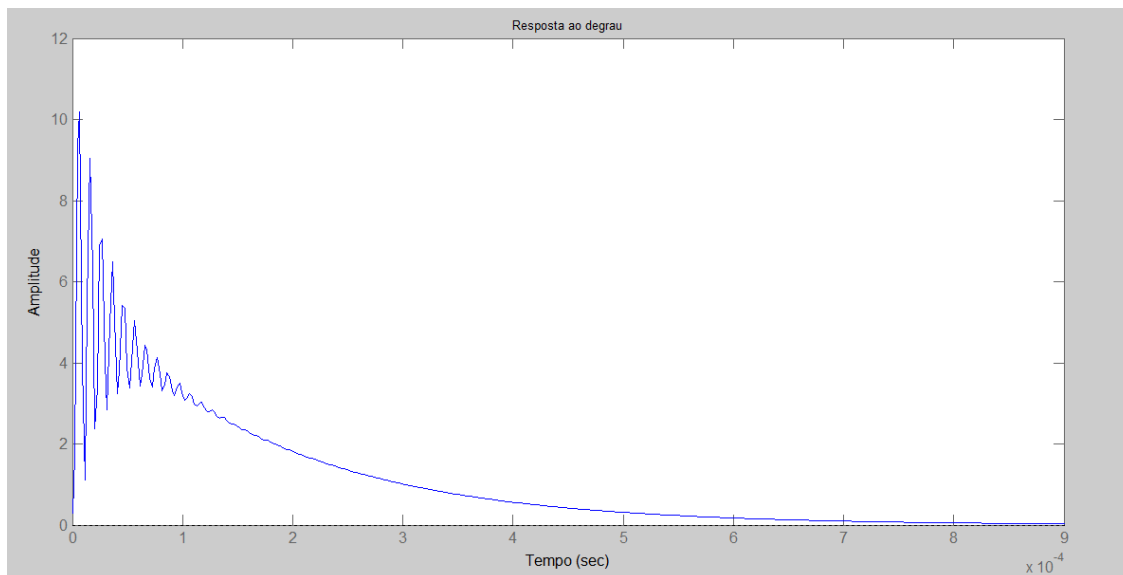


Figura 4.52 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

Com $n=50$ espiras no secundário em anel:

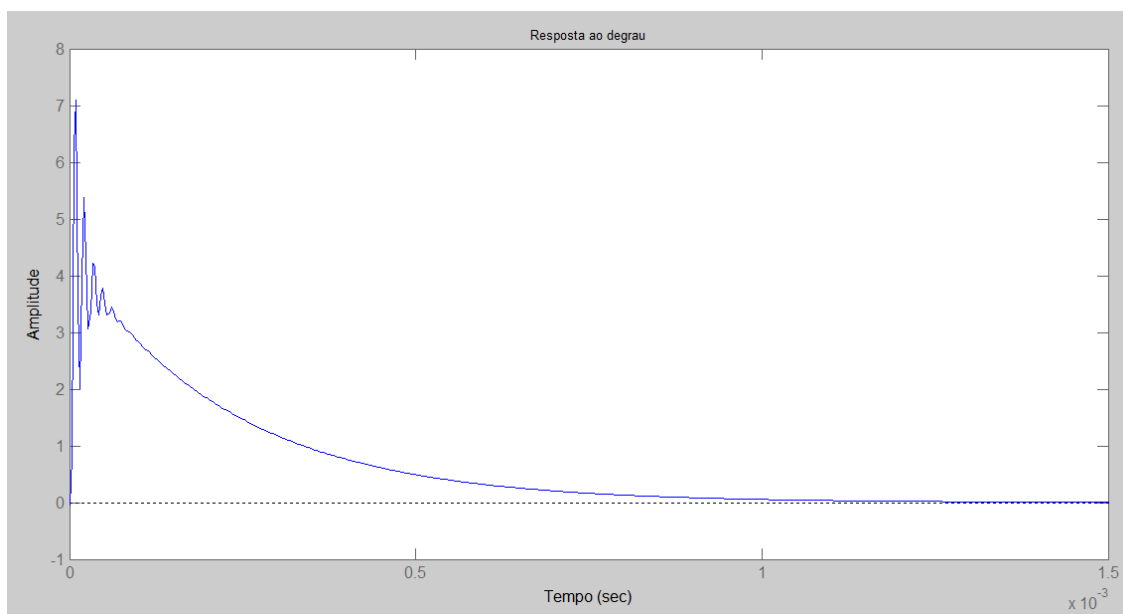


Figura 4.53 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 50 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário.

E por último para $n=200$ espiras no secundário em disco, tendo o primário 50 espiras na configuração em anel.

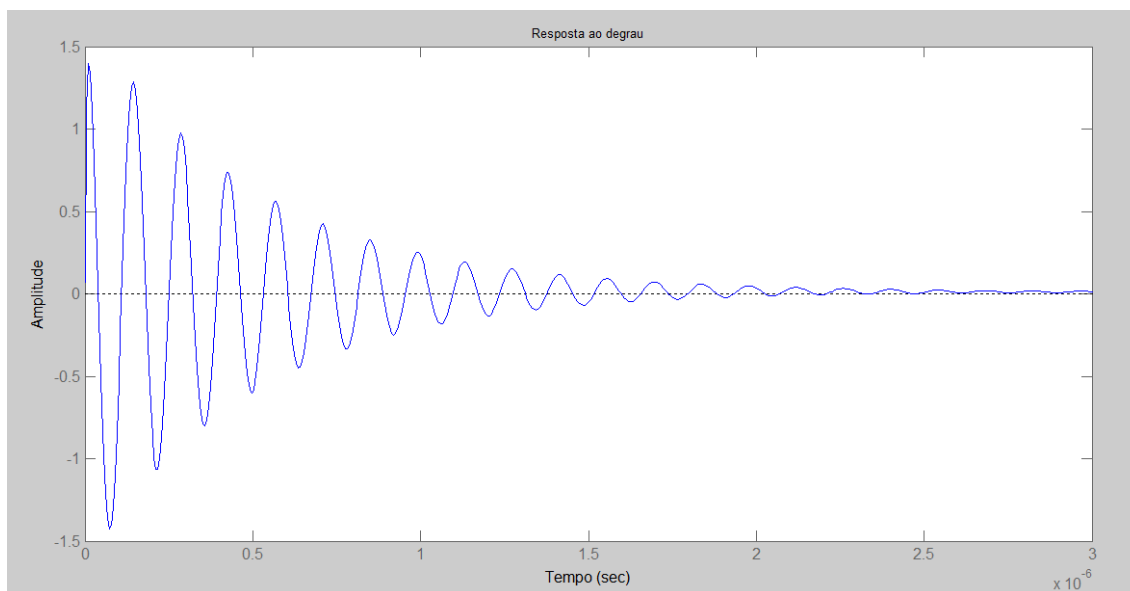


Figura 4.54 Resposta para o transformador para o circuito equivalente 4 tendo 50 espiras em anel no primário e 200 espiras em disco no secundário.

Através dos gráficos das Figuras 4.48 até 4.54, vê-se que a resposta do sistema é diferente ao obtido para os diferentes circuitos propostos anteriormente. Todavia, as respostas entre si são similares, ou seja, em todas as respostas para a quarta configuração há oscilações na resposta ao degrau. Espera-se que o circuito mais adequado seja determinado não só pela resposta em degrau, mas também pela similaridade que deve demonstrar a sua resposta em frequência.

4.7.2 Diagrama de Bode

Por último, obteve-se a resposta em frequência para a quarta configuração proposta do circuito equivalente. Essa resposta em frequência tem como entrada uma onda senoidal.

Para $n=2$ espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

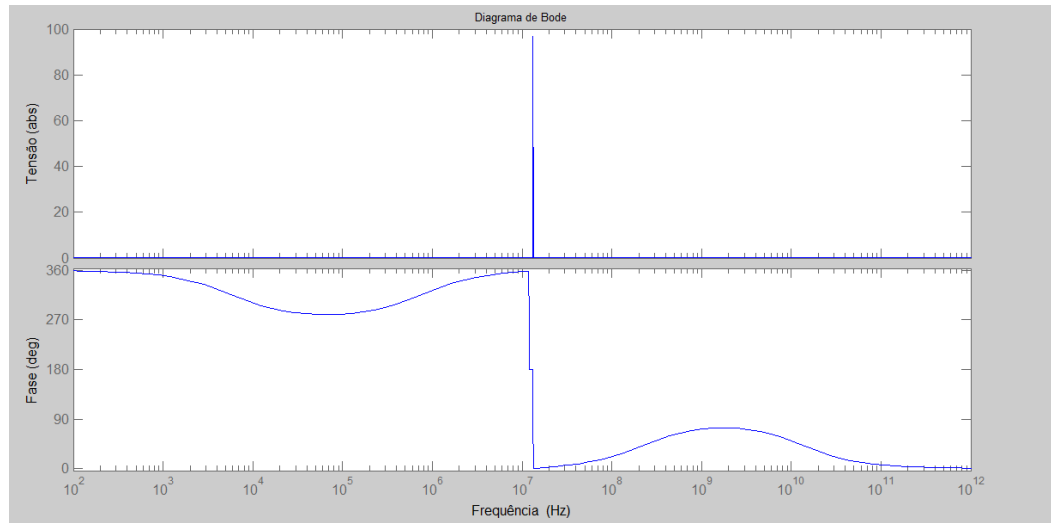
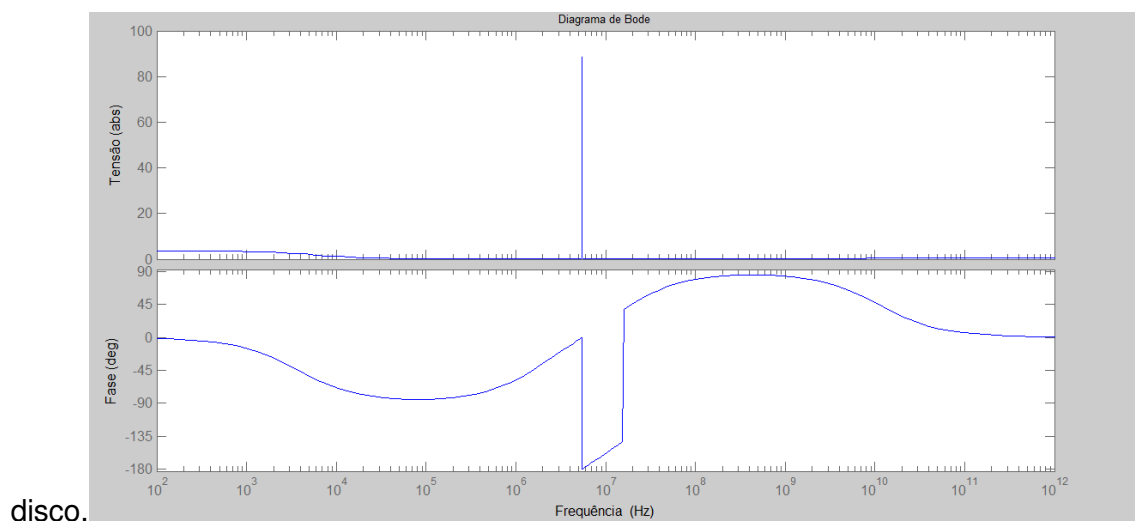


Figura 4.55 Diagrama de Bode para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para essa configuração, temos um pico bastante acentuado para baixo, típico de um sistema que apresenta um zero complexo conjugado no semi plano do lado esquerdo. Espera-se que esse pico represente a frequência de ressonância do dispositivo (transformador).

Para $n=7$ espiras no secundário em anel e 20 espiras no primário em



disco.

Figura 4.56 Diagrama de Bode para $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=7$ pode-se perceber que há um deslocamento para direita do pico, ou seja, um ligeiro aumento na frequência de ressonância do sistema.

Para $n=15$ espiras no primário em anel.

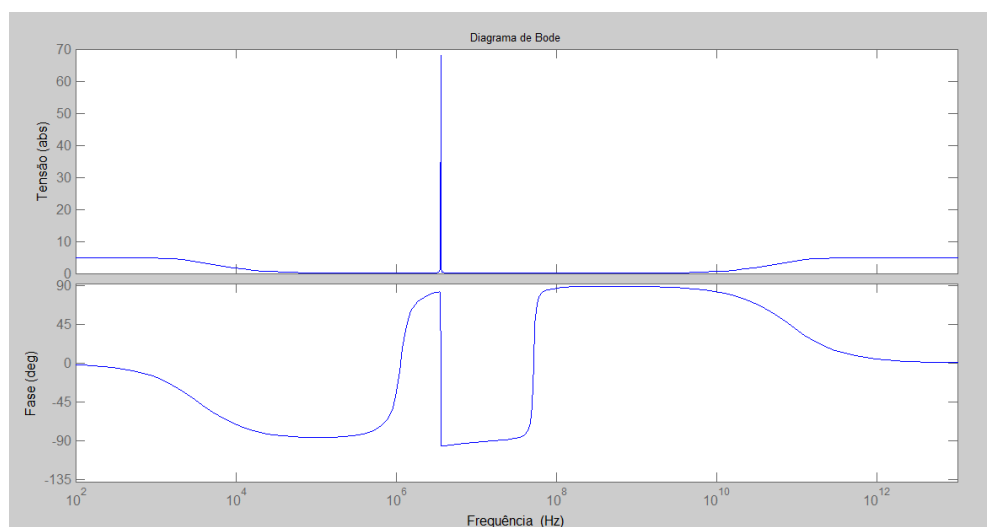


Figura 4.57 Diagrama de Bode para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Com o aumento do número de espiras e consequentemente do valor da resistência do transformador, tem-se um aumento da frequência de ressonância.

Para $n=20$ espiras em anel no primário do transformador.

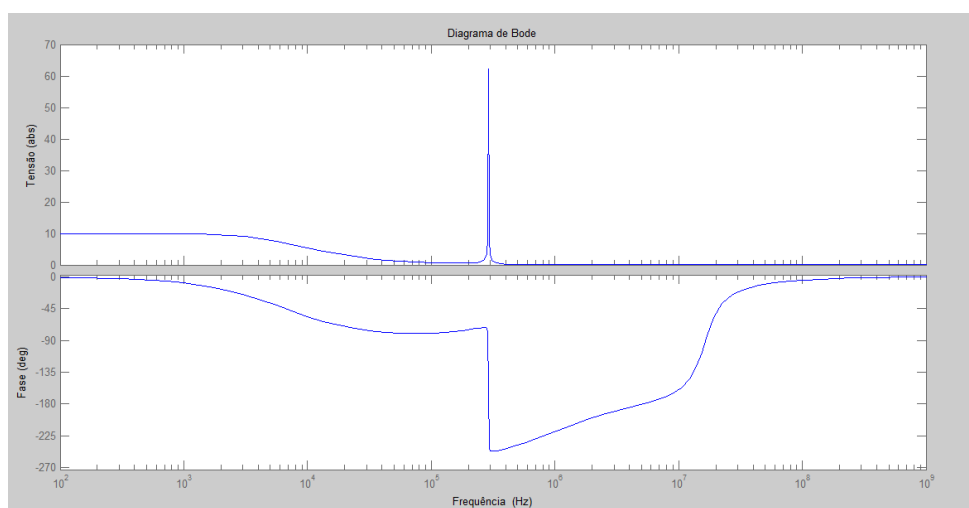


Figura 4.58 Diagrama de Bode para $n=20$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=30$ espiras no secundário do transformador.

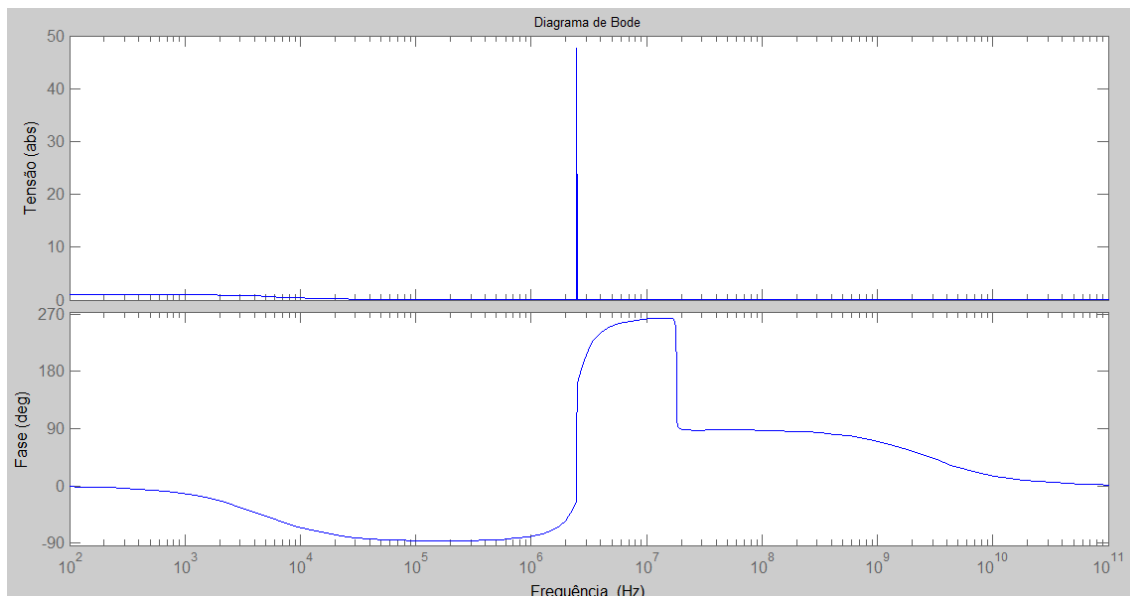


Figura 4.59 Diagrama de Bode para $n=30$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=50$ espiras.

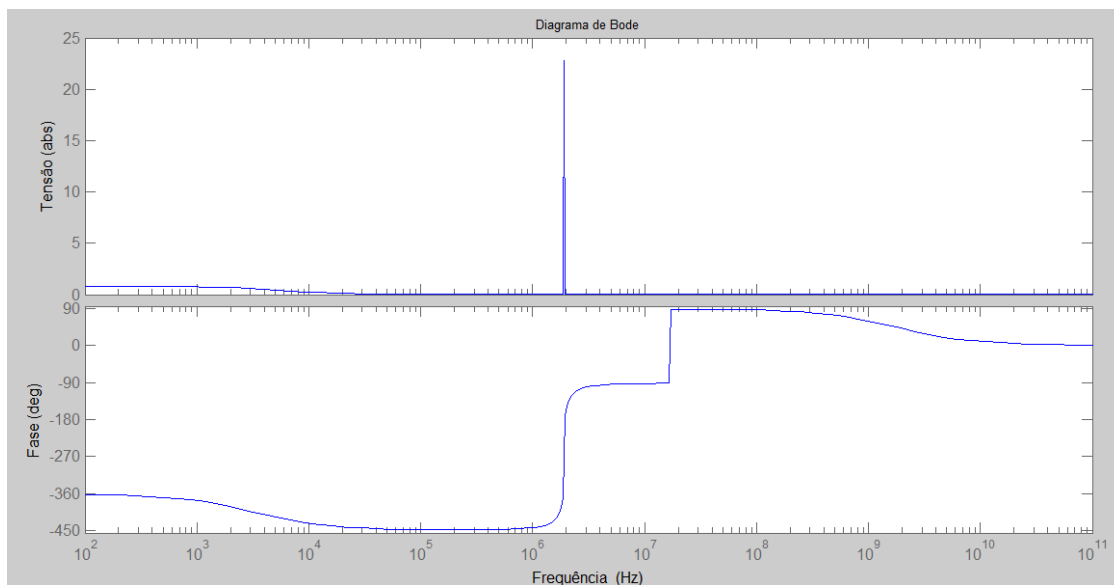


Figura 4.60 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco do transformador.

Para $n=200$ espiras no secundário do transformador em disco, tendo 50 espiras no primário na configuração em anel.

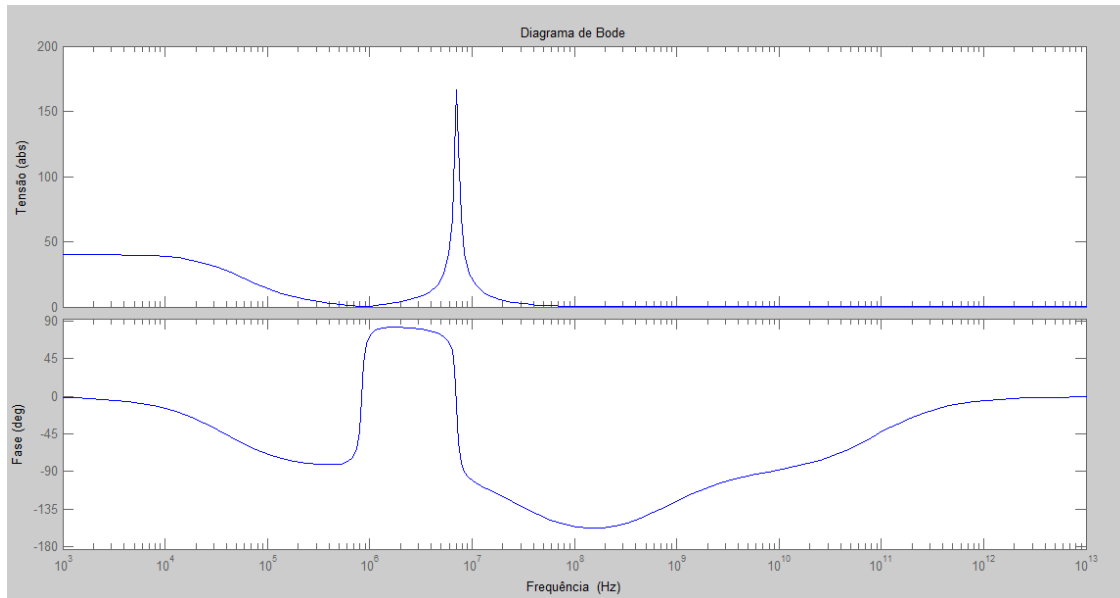


Figura 4.61 Diagrama de Bode para $n=50$ espiras no primário em anel e $n=200$ espiras no secundário em disco do transformador.

A frequência de ressonância ocorre com o pico que é visto ao longo das Figuras 4.55 até 4.61. Quando se compara com os gráficos anteriores de $n=2$ a $n=50$ com $n=200$, vê-se que há uma diferença quanto à resposta em frequência, o que talvez possa ser explicado pela diferente configuração da construção do transformador com o número de espiras igual à 200 apresentar uma compensação de resposta devido a uma maior expressividade de indutâncias e capacitâncias dessa bobina com 200 espiras.

A comparação entre os gráficos obtidos é apresentada na Figura 4.62

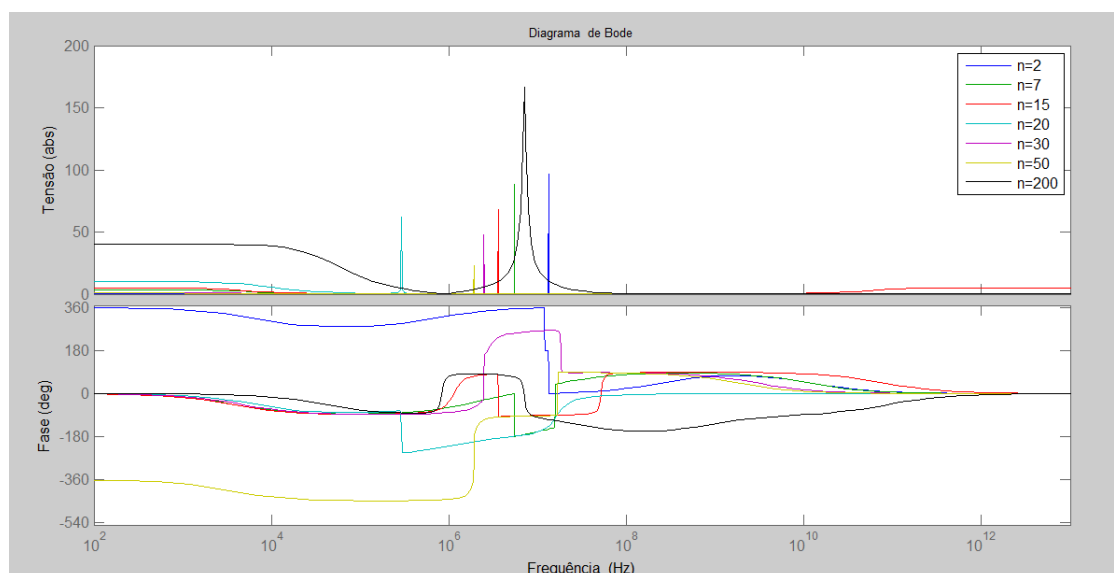


Figura 4.62 Comparação entre curvas.

Com a análise do gráfico da Figura 4.62, pode-se notar que há um pico de tensão em determinada frequência onde essa frequência é a de ressonância que se altera de acordo com o número de espiras no primário.

Nas próximas seções são apresentados testes experimentais nesse transformador de bobinas planas com diferentes valores do número de espiras em anel ($n=2, 7, 15, 20, 30$ e 50) e para o transformador de bobinas disco (com $n=50$ e $n=200$). Após os resultados experimentais, será verificado por meio de comparações quais desses modelos propostos do circuito equivalente do transformador de bobinas planas e anelares será mais compatível com as respostas obtidas computacionalmente.

4.8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS: RESPOSTA AO DEGRAU.

Após simular os circuitos equivalentes no MatLab, foi-se ao laboratório e se obteve a resposta ao degrau experimentalmente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.63 apresenta a resposta experimental para o transformador onde apresenta no primário duas espiras e cinquenta espiras no secundário tendo a frequência de 1 kHz.

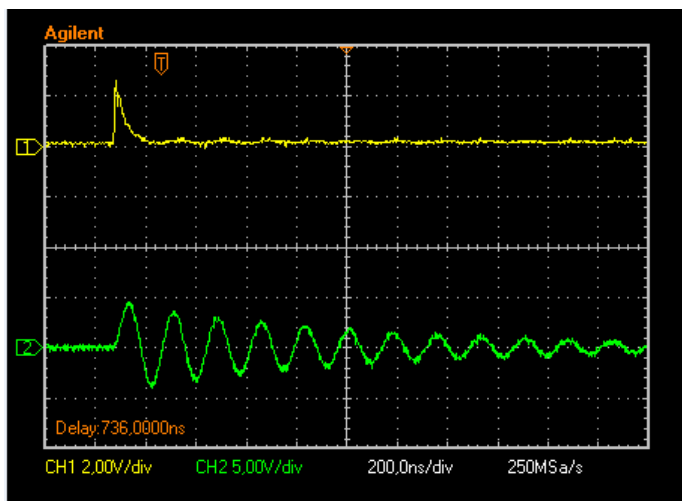


Figura 4.63 Resposta ao degrau para o transformador contendo duas espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 1 kHz.

Na Figura 4.64 se tem a resposta para mesma configuração ($n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco), porém com a frequência de 100 kHz.

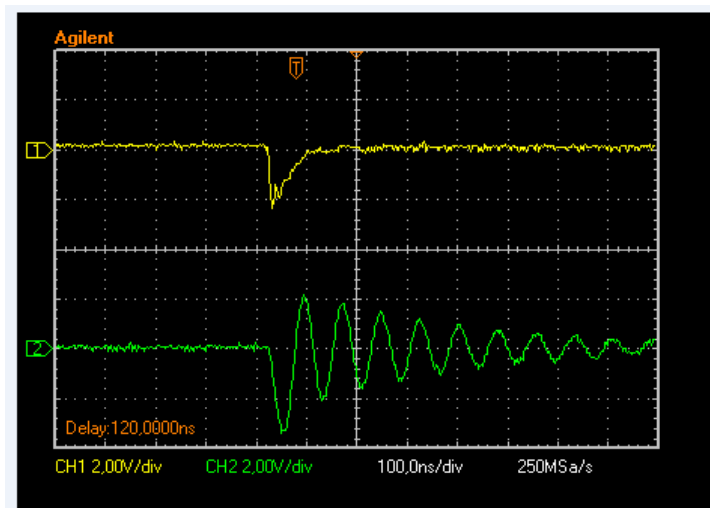


Figura 4.64 Resposta ao degrau para o transformador contendo duas espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 100 kHz.

Na Figura 4.65 se tem a resposta com $n=7$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco, porém com a frequência de 100kHz

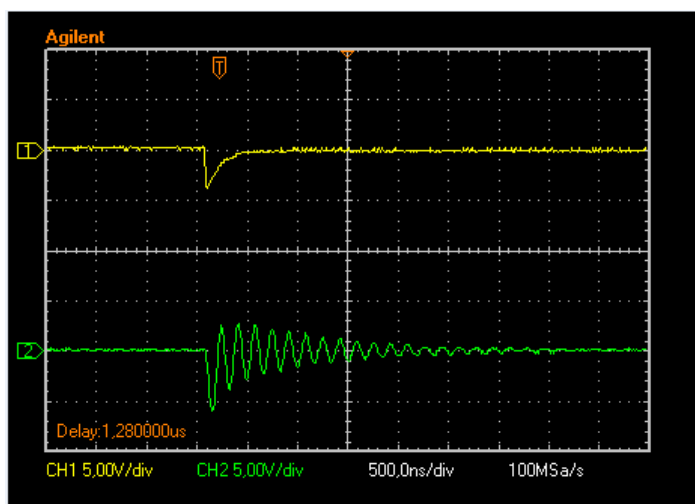


Figura 4.65 Resposta ao degrau para o transformador contendo sete espiras no primário e cinquenta no secundário com frequência de 100kHz.

Na Figura 4.66 se tem a resposta experimental para o transformador de bobinas planas tendo no primário 20 espiras em anel e no secundário 50 espiras em disco para uma frequência de 200 kHz.

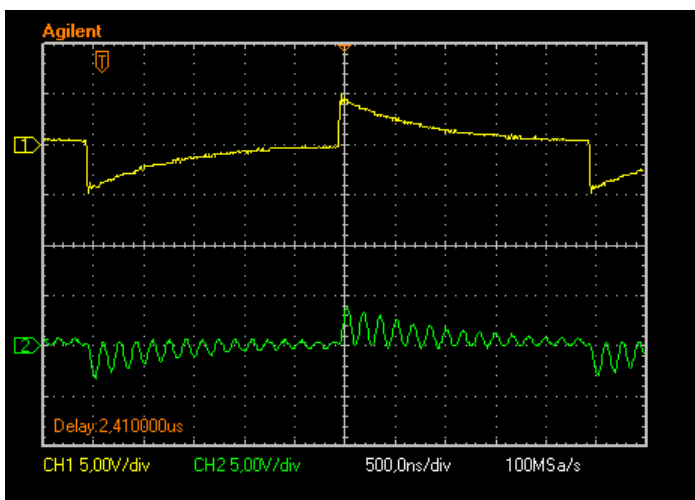


Figura 4.66 Resposta ao degrau para o transformador contendo 20 espiras no primário e 50 espiras no secundário com frequência de 200 kHz.

Na Figura 4.67 se tem a resposta para 50 espiras no primário em anel e 50 espiras em disco do transformador de bobinas planas, porém com a frequência de 100 kHz.

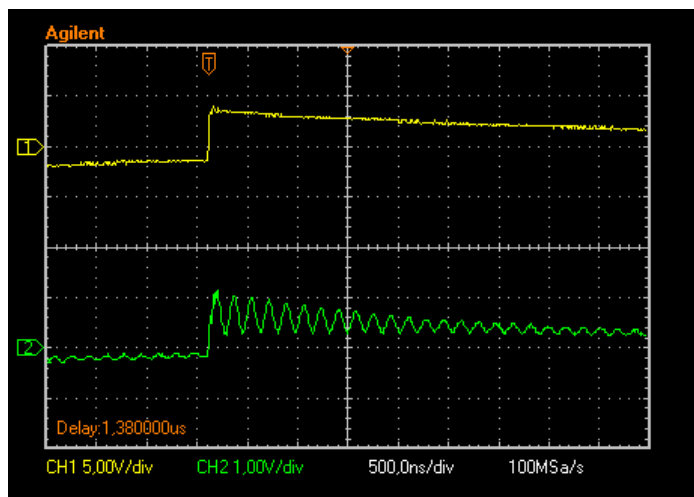


Figura 4.67 Resposta ao degrau para o transformador contendo 50 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco com frequência de 100 kHz.

Na Figura 4.68 se tem a resposta experimental para 200 espiras em disco no secundário e 50 espiras em anel no primário com a frequência de 300kHz.

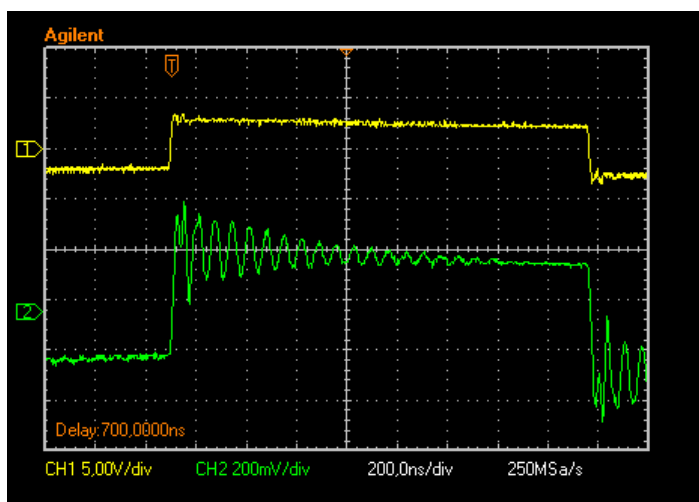


Figura 4.68 Resposta ao degrau para o transformador contendo 200 espiras em disco no secundário e 50 espiras em anel no primário com frequência de 300 kHz

4.9 COMPARAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS.

Após os resultados obtidos tanto computacionais quanto experimentais, fez-se a comparação para qual dos circuitos equivalentes apresentam uma resposta mais apropriada com o que acontece na prática.

A Figura 4.69 representa a resposta ao degrau para o primeiro modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

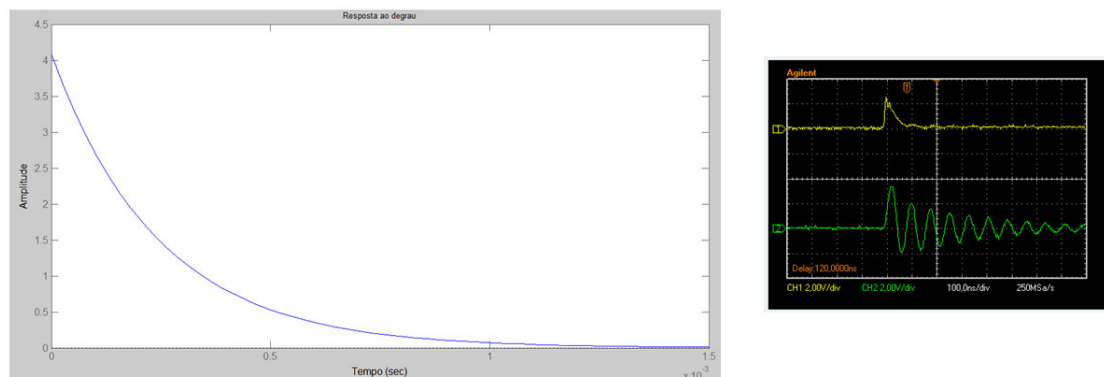


Figura 4.69 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o primeiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.70 representa a resposta ao degrau para o segundo modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

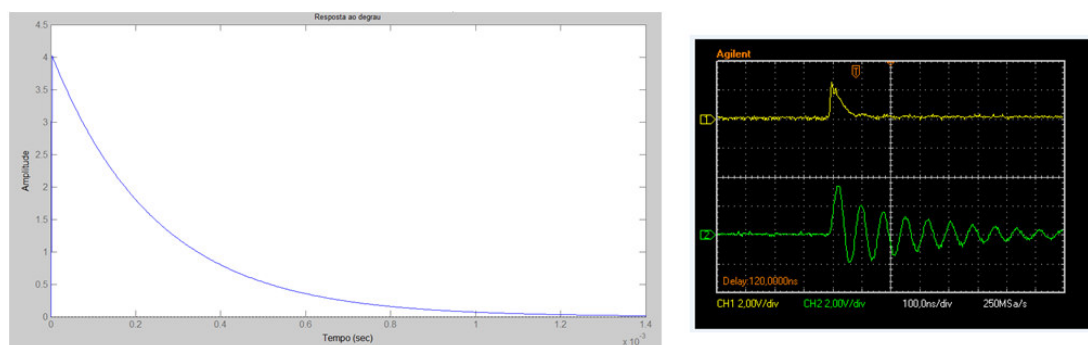


Figura 4.70 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o segundo modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.71 representa a resposta ao degrau para o terceiro modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

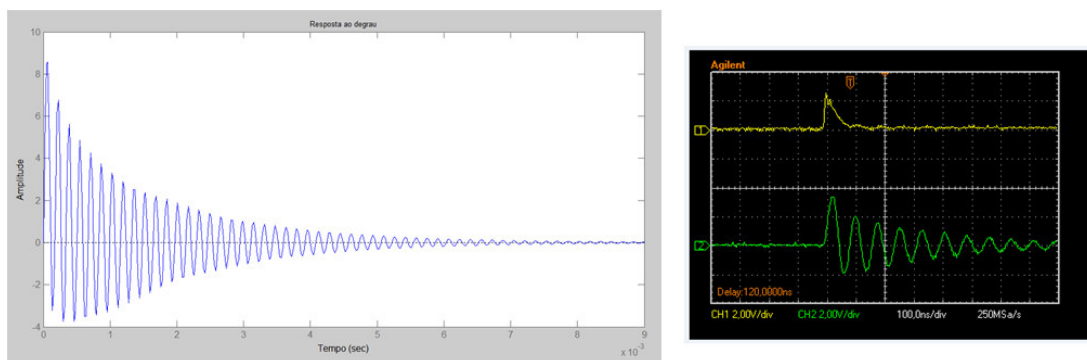


Figura 4.71 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o terceiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.72 representa a resposta ao degrau para o quarto modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=2$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

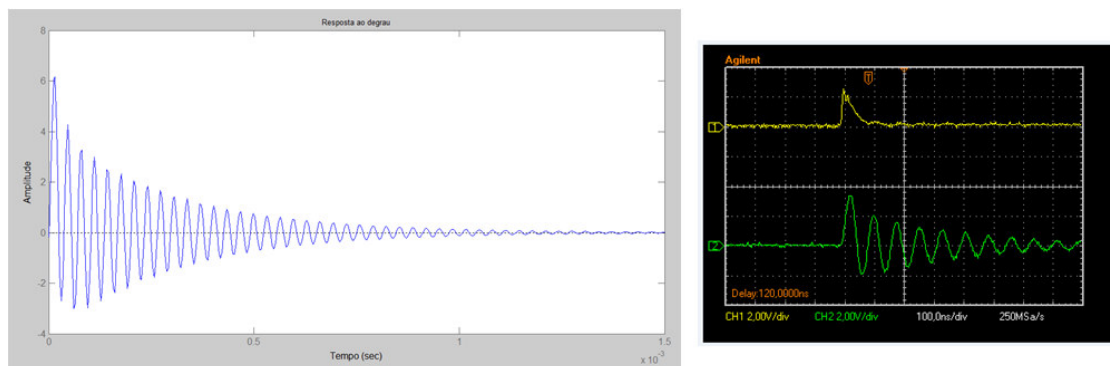


Figura 4.72 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o quarto modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.73 representa a resposta ao degrau para o primeiro modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

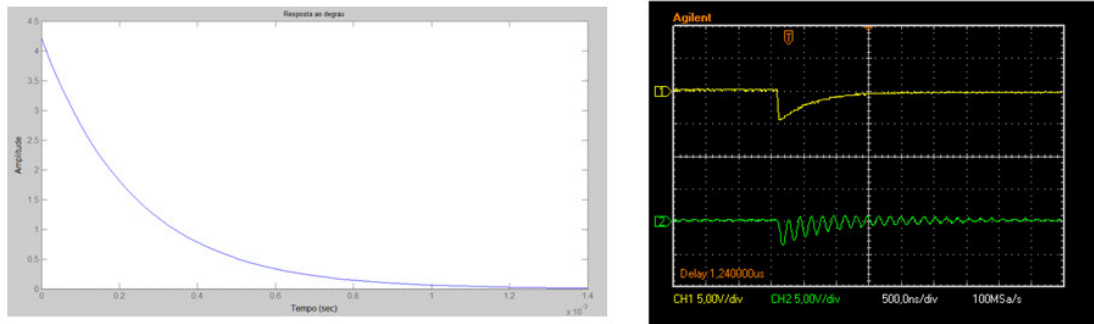


Figura 4.73 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o primeiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.74 representa a resposta ao degrau para o segundo modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

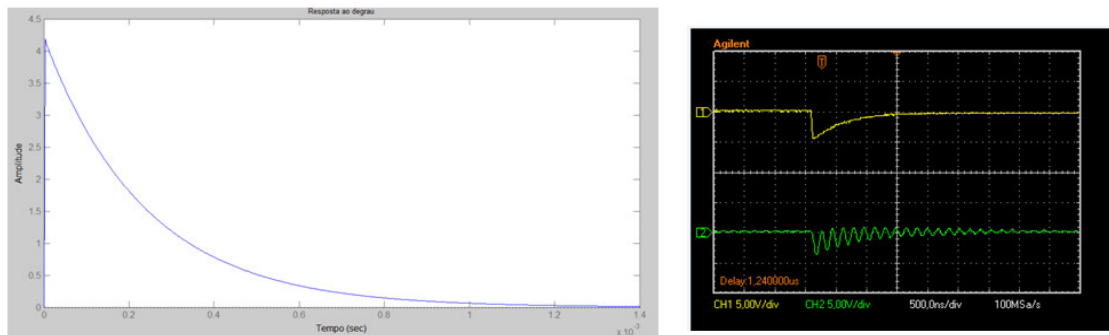


Figura 4.74 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o segundo modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.75 representa a resposta ao degrau para o terceiro modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

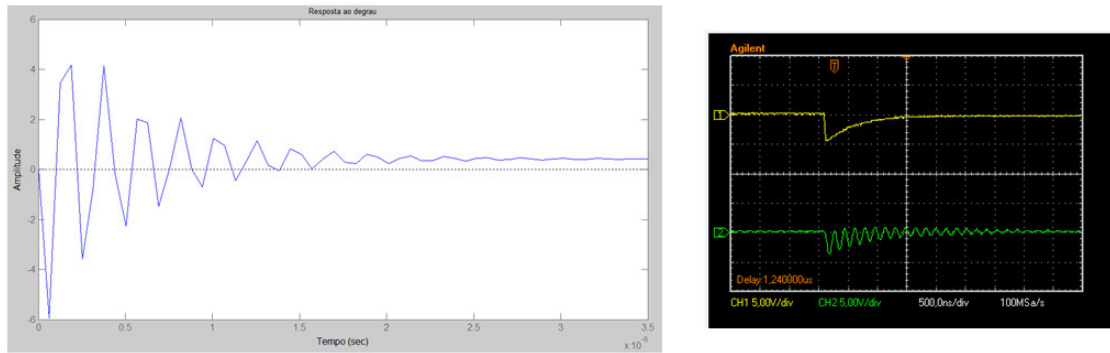


Figura 4.75 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o terceiro modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

A Figura 4.76 representa a resposta ao degrau para o quarto modelo proposto para o circuito equivalente em comparação com a resposta experimental para $n=15$ espiras no primário em anel e $n=50$ espiras no secundário em disco.

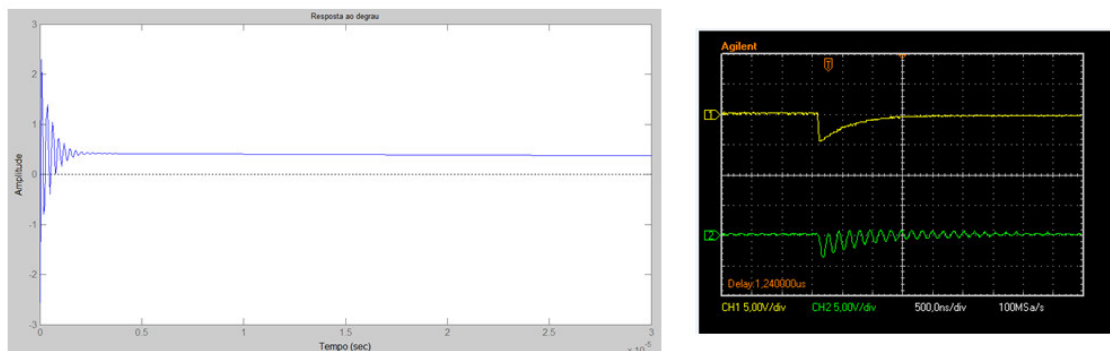


Figura 4.76 Comparação entre a resposta computacional e experimental para o quarto modelo proposto como circuito equivalente para o transformador de bobinas planas.

4.10 COMPARAÇÕES ENTRE CIRCUITOS EQUIVALENTES.

Ao comparar as respostas ao degrau para cada circuito equivalente com a resposta obtida experimentalmente se percebe que o modelo 1 e o modelo 2 não apresentam semelhança com o sistema real, logo nota-se que o modelo 3 e o modelo 4 apresentam respostas semelhantes ao sistema. A única diferença entre os modelos 3 e 4 está relacionada à capacitância parasita que o modelo 4 apresentam em paralelo com a indutância mútua referente ao acoplamento do primário e secundário.

CAPÍTULO 5

5.1 ANÁLISE DE RESULTADOS PARA ONDA QUADRADA: SÉRIE DE FOURIER.

Neste Capítulo, pretende-se mostrar que a onda quadrada é uma soma de senóides de acordo com a série de Fourier. Após essa demonstração será obtida a resposta em frequência do circuito equivalente do transformador de bobinas planas para entrada em onda quadrada.

5.2 REPRESENTAÇÃO DE SINAIS PERIÓDICOS VIA SÉRIE DE FOURIER.

Para um sinal $x(t)$ periódico com período T_0 , se tem a seguinte propriedade:

$$x(t) = x(t + T_0) \quad \text{para todo } t \quad (5.1)$$

Onde o menor valor de T_0 que satisfaz a condição de periodicidade (5.1) é o período fundamental de $x(t)$. Esta equação implica em que $x(t)$ começa em $-\infty$ e continua até ∞ [13]. Na Figura 5.1 se tem a representação de um sinal periódico onde pode ser representado pela série de Fourier.

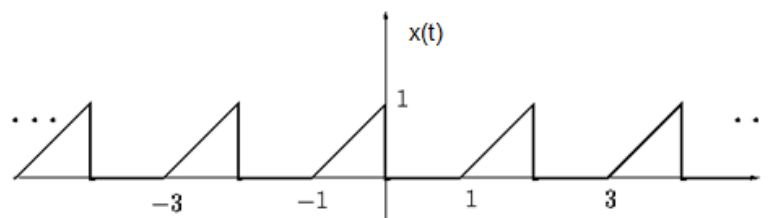


Figura 5.1 Representação de um sinal periódico.

A frequência de senóide $\cos 2\pi f_n t$ ou $\sin 2\pi f_n t$ é f_n e o período é $T_0 = \frac{1}{f_n}$. Essas senóides também podem ser expressas como $\cos \omega_n t$ ou $\sin \omega_n t$, na qual $\omega_n = 2\pi f_n$ é a frequência em radianos. A senóide de frequência $n f_n$ é dita a n -ésima harmônica da senóide de frequência f_n [13].

Segundo Fourier se pode representar qualquer sinal periódico por uma série trigonométrica. Considerando o sinal periódico $x(t)$ constituído por senos e cossenos

de frequência ω_0 e todas as suas harmônicas com amplitudes arbitrárias se tem [13]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t \quad (5.2)$$

Onde ω_0 é a chamada frequência fundamental.

Para se obter os coeficientes da série de Fourier basta apenas resolver as seguintes equações:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (5.3)$$

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt \quad (5.4)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (5.5)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (5.6)$$

Com a determinação desses parâmetros se pode escrever a série de Fourier para qualquer sinal periódico.

5.3 SÉRIE DE FOURIER PARA UMA ONDA QUADRADA.

Como segundo Fourier qualquer sinal periódico pode ser representado por uma série trigonométrica, e a onda quadrada que é de interesse nesse trabalho de conclusão de curso, será representada conforme se segue.

Para determinar a série de Fourier de qualquer sinal periódico é necessário calcular os coeficientes da série de acordo com as Equações (5.4), (5.5) e (5.6), substituindo esses coeficientes calculados na Equação (5.2). A Figura 5.2 mostra uma onda quadrada qualquer.

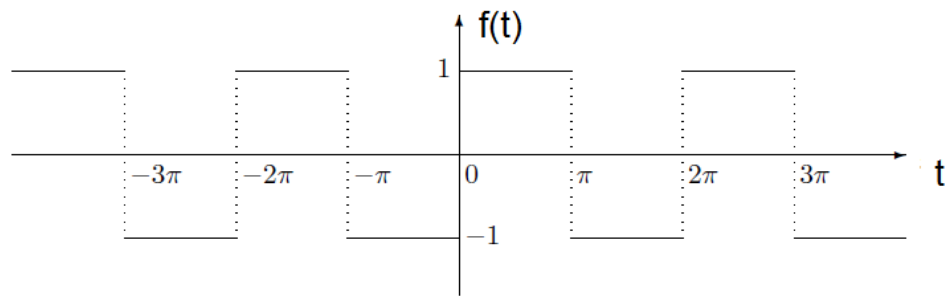


Figura 5.2 Onda quadrada com período de 2π [14].

Tomando a Figura 5.2 como referência, pode-se determinar a série para essa onda quadrada.

O primeiro passo é encontrar o período da onda, e pela Figura 5.2 é fácil perceber que o período desse sinal é igual a $T_0 = 2\pi$. Como se sabe, $\omega_0 = 2\pi f_0$ ou $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$, logo o valor de ω_0 é

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (5.7)$$

Sendo $T_0 = 2\pi$ e substituindo em (5.7) se tem:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{2\pi}$$

$$\omega_0 = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Logo a frequência em radianos desse sinal é igual a 1 radiano por segundo [14].

O próximo passo é determinar a função desse sinal nesse caso se tem:

$$f(t) = \begin{cases} -1, & -\pi \leq t < 0 \\ 1, & 0 \leq t < \pi \end{cases} \quad (5.8)$$

Com a função determinada, se calcula os coeficientes a_n, a_n e b_n , respectivamente.

Calculando a_0 de acordo com (5.4) se tem:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt \quad (5.9)$$

Onde $T_0 = 2\pi$ e $x(t) = f(t)$ obedecendo à equação (5.8), substituindo na equação (5.9) encontra-se:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt$$

Dividindo em dois intervalos fica:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 f(t) dt + \int_0^{\pi} f(t) dt \right]} \quad (5.10)$$

Substituindo $f(x)$ na equação (5.10) de acordo com os intervalos apropriados, o que pode ser visto na equação (5.8) se tem:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) dt + \int_0^{\pi} (1) dt \right]}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) dt + \int_0^{\pi} (1) dt \right]}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi \left[-t \Big|_{-\pi}^0 + t \Big|_0^{\pi} \right]}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi \left[- \left(0 - (-\pi) \right) + (\pi - 0) \right]_{\pi}}$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi [-\pi + \pi]}$$

$$a_0 = 0 \quad (5.11)$$

Com isso encontrou-se o coeficiente a_0 para série de Fourier para esse sinal. Agora se calcula o valor de a_n . De acordo com a equação (5.5) se pode escrever:

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (5.12)$$

Como foi calculado anteriormente o período e a frequência em radianos ($T_0 = 2\pi$ e $\omega_0 = 1 \frac{rad}{s}$), ao substituindo na equação (5.12) se tem:

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \int_{T_0} f(t) \cos nt dt$$

Dividindo em dois intervalos fica:

$$a_n = \frac{2}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 f(t) \cos nt dt + \int_0^{\pi} f(t) \cos nt dt \right]} \quad (5.13)$$

Substituindo $f(x)$ na equação (5.13) de acordo com equação (5.8) se tem:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) * \cos nt dt + \int_0^{\pi} (1) * \cos nt dt \right]} \\ a_n &= \frac{1}{\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) * \cos nt dt + \int_0^{\pi} (1) * \cos nt dt \right]} \\ a_n &= \frac{1}{\pi \left[- \int_{-\pi}^0 \cos nt dt + \int_0^{\pi} \cos nt dt \right]} \\ a_n &= \frac{1}{\pi n \left[-(\sin nt) \Big|_{-\pi}^0 + (\sin nt) \Big|_0^{\pi} \right]} \\ a_n &= \frac{1}{\pi n \left[-(\sin 0 - \sin \pi) + (\sin \pi - \sin[0]) \right]} \end{aligned}$$

Como $\sin 0 = 0$ e $\sin \pi = 0$, então:

$$a_n = 0 \quad (5.14)$$

Resta agora apenas encontrar o coeficiente b_n , como de acordo com a equação (5.6) se tem:

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin n\omega_0 t dt$$

Substituindo os valores encontrados, do período e da frequência em radianos, fica:

$$b_n = \frac{2}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 f(t) \sin nt dt + \int_0^{\pi} f(t) \sin nt dt \right]} \quad (5.15)$$

Substituindo $f(x)$ na Equação (5.15) apropriadamente de acordo com Equação (5.8) se tem:

$$b_n = \frac{2}{2\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) * \sin nt \, dt + \int_0^{\pi} (1) * \sin nt \, dt \right]}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi \left[\int_{-\pi}^0 (-1) * \sin nt \, dt + \int_0^{\pi} (1) * \sin nt \, dt \right]}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi \left[- \int_{-\pi}^0 \sin nt \, dt + \int_0^{\pi} \sin nt \, dt \right]}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n \left[-(-\cos nt) \Big|_{-\pi}^0 + (-\cos nt) \Big|_0^{\pi} \right]}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n \left[(\cos nt) \Big|_{-\pi}^0 + (-\cos nt) \Big|_0^{\pi} \right]}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n} \left[[(\cos) 0 - \cos(-n\pi)] - (\cos(n\pi) - [(\cos) 0]) \right]$$

$$b_n = 1/\pi n [1 - \cos(-n\pi)] - (\cos(n\pi) - 1)$$

$$b_n = 1/\pi n [1 - \cos(-n\pi)] - (\cos(n\pi) - 1)$$

$$b_n = 1/\pi n [1 - \cos(-n\pi) - \cos(n\pi) + 1]$$

Como $\cos(-n\pi) = \cos(n\pi)$ pelo fato de cosseno ser uma função par, se tem:

$$b_n = 1/\pi n [1 - \cos(n\pi) - \cos(n\pi) + 1]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n [2 - 2\cos(n\pi)]}$$

$$b_n = \frac{2}{\pi n [1 - \cos(n\pi)]} \quad (5.16)$$

Logo, para uma representação da onda quadrada em série de Fourier basta substituir as Equações (5.11), (5.14) e (5.16) na Equação (5.2), tendo:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi n} [1 - \cos(n\pi)] * \sin nt \quad (5.17)$$

Para se determinar o valor de b_n tem-se que analisar o valor de n .

$$b_n = \begin{cases} 0, & \text{se } n \text{ é par} \\ \frac{4}{\pi n}, & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases}$$

Pois se n for par, $\cos(n\pi) = 1$, e a expressão de (5.16) é sempre igual a zero, já se n for ímpar, $\cos(n\pi) = -1$, e a expressão de (5.16) é sempre igual a $\frac{4}{n\pi}$.

Logo, só há termos quando n for ímpar, e a Equação (5.17) fica da seguinte forma:

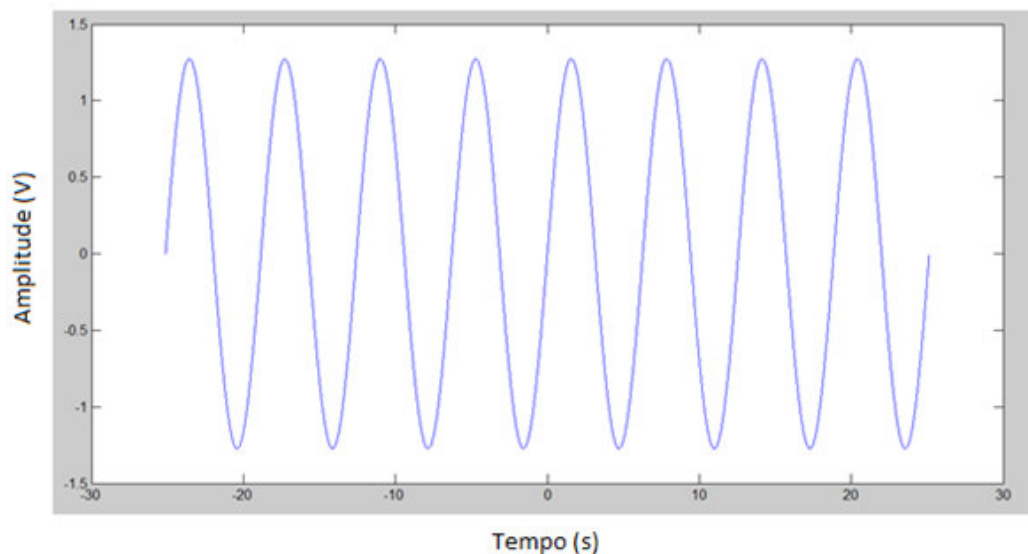
$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} * \sin nt \quad (5.18)$$

Para representa a Equação (5.18) em suas componentes da série de Fourier basta apenas substituir o valor de n por seus valores ímpares, como de acordo com a Equação (5.19).

$$f(t) = \frac{4}{\pi} * \sin t + \frac{4}{3\pi} * \sin 3t + \frac{4}{5\pi} * \sin 5t + \frac{4}{7\pi} * \sin 7t + \frac{4}{9\pi} * \sin 9t + \dots \quad (5.19)$$

Pode-se demonstrar que quanto mais termo se acrescenta a série mais próxima de uma onda quadrada o sinal se torna.

Para apenas um termo, ou seja, $n=1$ se tem o seguinte gráfico:



Figura

5.3 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com apenas um termo ($n=1$).

Para dois termos, ou seja, $n=1$ e $n=3$ têm-se o novo gráfico de acordo com a Figura 5.4.

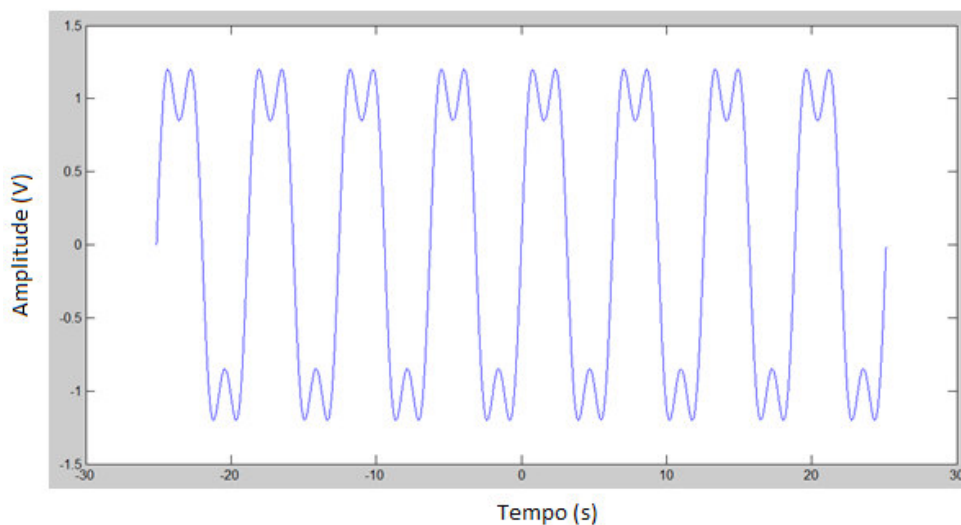


Figura 5.4 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com dois termos ($n=1$ e $n=3$).

Quando se aumenta os termos para três, ou seja, $n=1$, $n=3$ e $n=5$ o gráfico apresenta a seguinte característica:

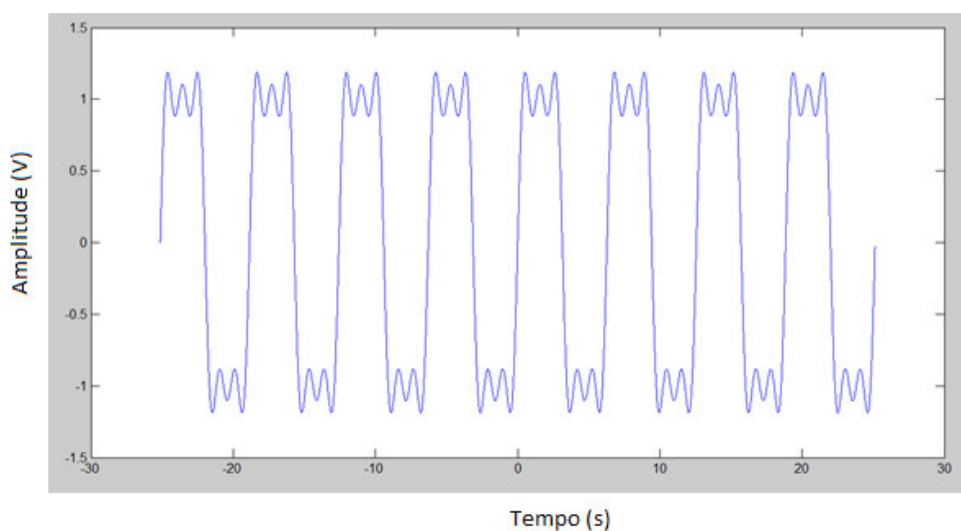


Figura 5.5 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com três termos ($n=1$, $n=3$ e $n=5$).

Pode-se perceber que o sinal que tinha apenas um termo apresentava uma onda senoidal, agora com a inclusão de termos na série há uma tendência do sinal a se transformar em uma onda quadrada. A Figura 5.6 mostra o sinal com quatro termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$ e $n=7$).

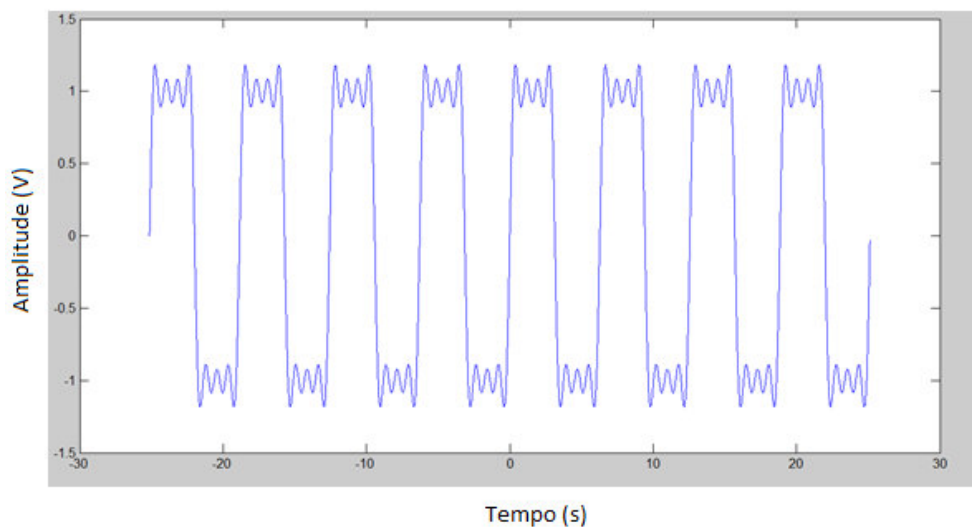


Figura 5.6 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com quatro termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$ e $n=7$).

Para cinco termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$, $n=7$ e $n=9$) se tem a seguinte resposta:

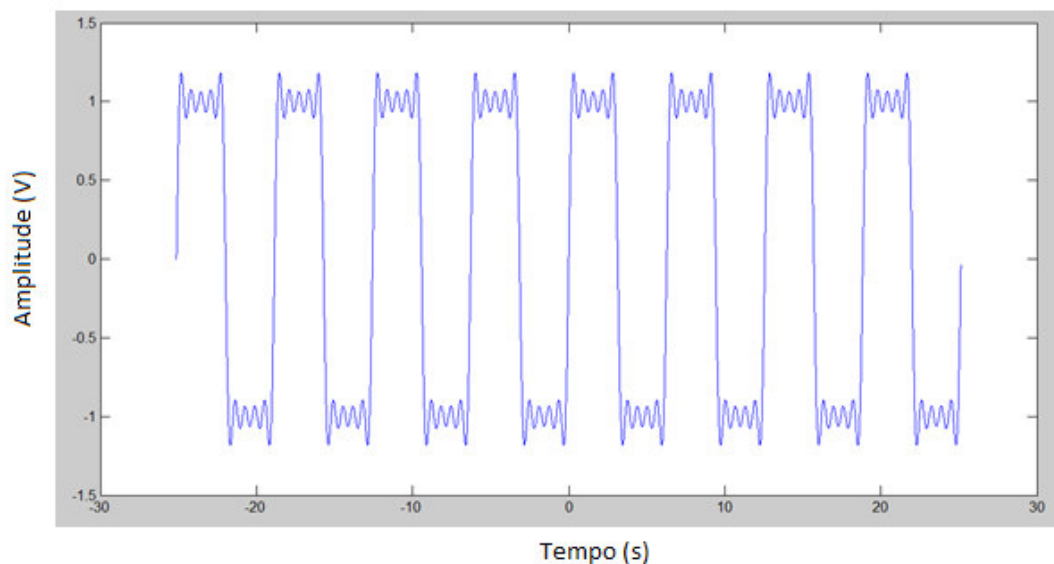


Figura 5.7 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com cinco termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$, $n=7$ e $n=9$).

Se acrescentar mais um termo a série, o sinal assume a seguinte forma, como mostrado na Figura 5.8.

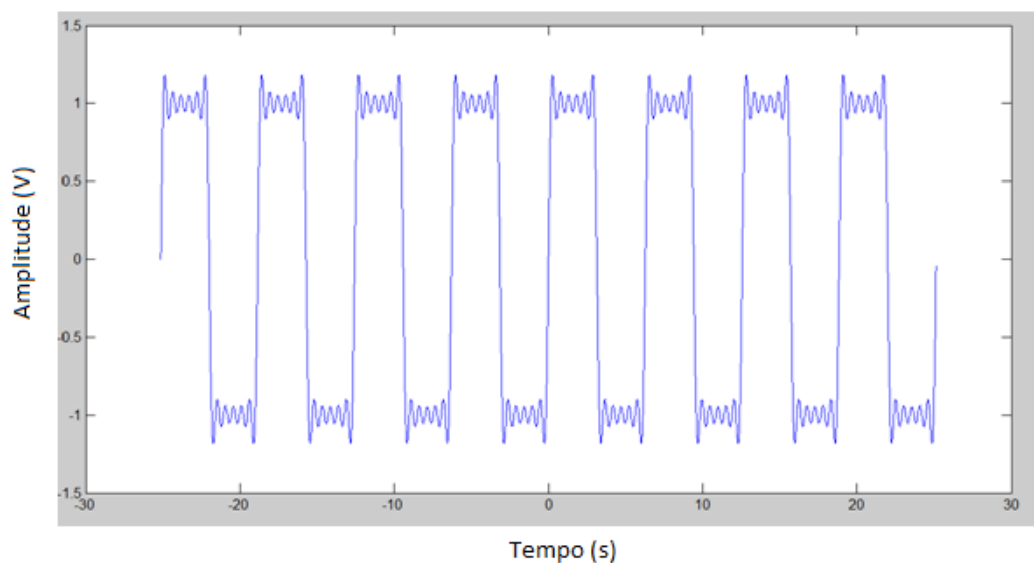


Figura 5.8 Sinal da onda quadrada. Aproximação da série de Fourier com seis termos ($n=1$, $n=3$, $n=5$, $n=7$, $n=9$ e $n=11$).

Com isso prova-se que uma onda quadrada nada mais é que uma soma de senóides. Ao continuar a acrescentar termos a série, o sinal vai se tornando cada vez mais próximo de uma onda quadrada perfeita. A Figura 5.9 mostra a evolução do sinal desde a onda quadrada com apenas um único termo até o sinal com os seus seis termos somados.

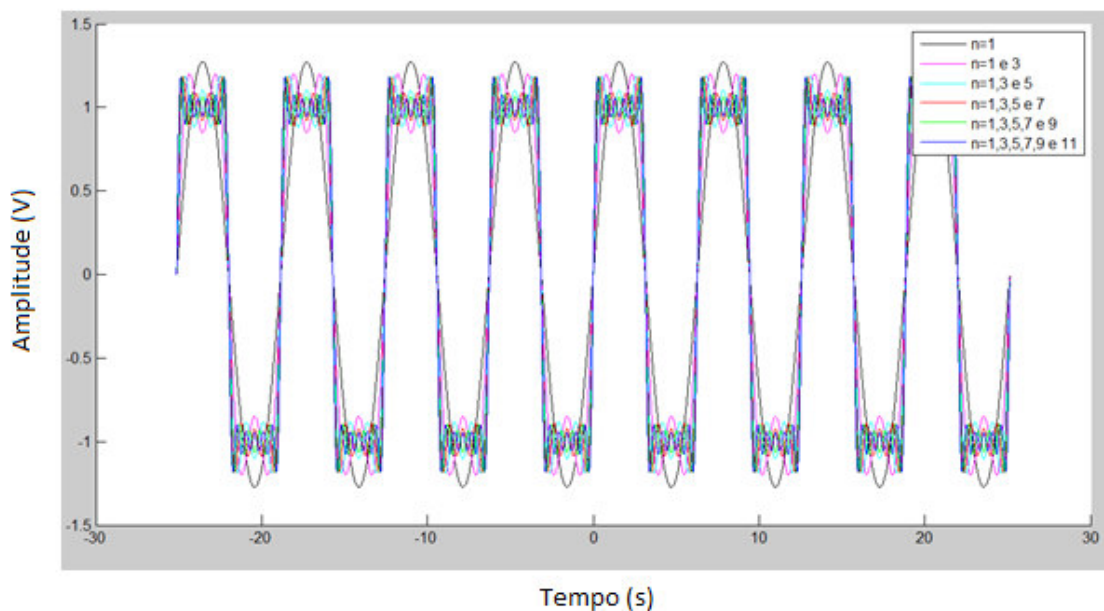


Figura 5.9 Sinal da onda quadrada. Evolução do sinal a cada acréscimo dos termos na série de Fourier.

A onda quadrada pode ser representada por uma série trigonométrica de Fourier apresentando uma maior semelhança a forma de onda quadrada com o aumento do número de termos somados (senóides) a série, a Figura 5.9 ilustra tal afirmação.

5.4 RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA PARA O TRANSFORMADOR DE BOBINAS PLANAS TENDO COMO ENTRADA UMA ONDA QUADRADA.

Para uma entrada em onda quadrada no primário do transformador onde esse sinal é formado por um soma de senóides como demonstrado na seção 5.2, tem-se as seguintes respostas em frequência para o secundário do transformador de bobinas planas, de acordo com as Figuras que se seguem. Em todos os experimentos considerou-se o secundário fixo com 50 espiras em disco e variou-se o número de espiras no primário mantendo-se a configuração em anel para o primário do transformador.

Primeiro irá se mostrar a resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente proposta para o transformador de bobinas planas.

Para $n_p=2$ (duas espiras no primário em anel e 50 no secundário em disco) e apenas um único termo da série de Fourier que compõe a onda quadrada, tem-se a seguinte resposta em frequência:

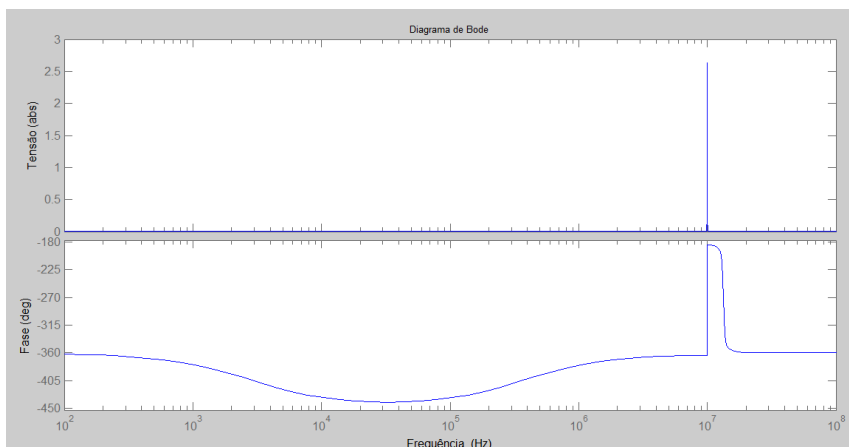


Figura 5.10 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $np=2$ (duas espiras no primário em anel e 50 no secundário em disco) e já com dois termos da série de Fourier se tem:

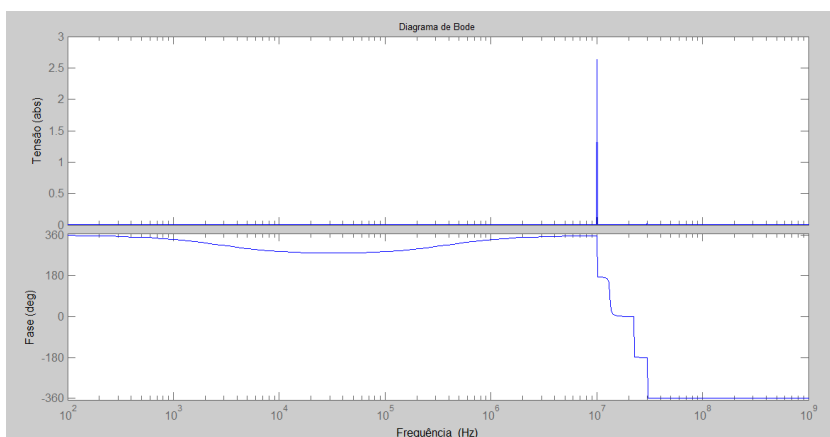


Figura 5.11 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e dois termos da série de Fourier.

Percebe-se o efeito do acréscimo de mais uma senóide na série de Fourier que forma a onda quadrada.

Para $np=2$ em anel e $ns=50$ em disco, porém agora com o acréscimo de mais um termo ficando três termos na série de Fourier.

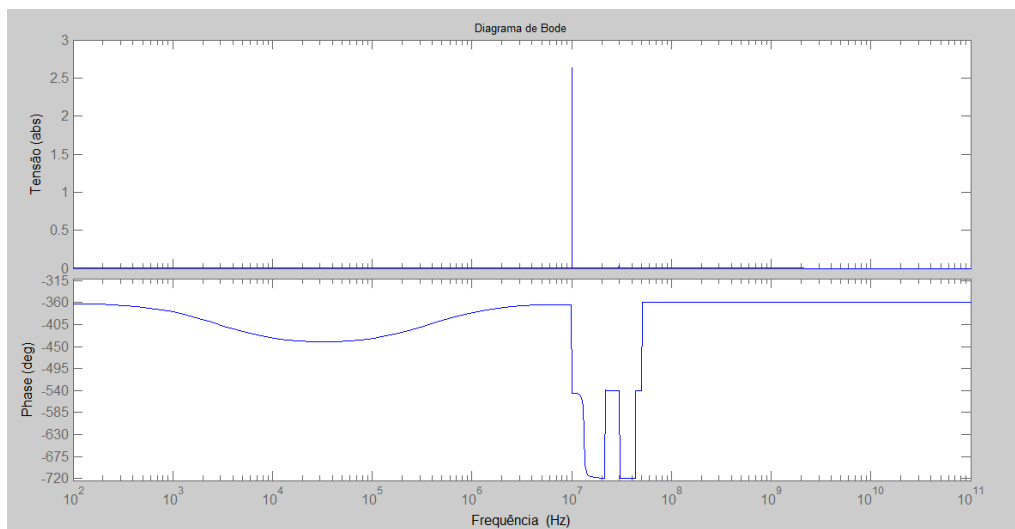


Figura 5.12 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e três termos da série de Fourier.

A Figura 5.13 mostra a resposta em frequência para $np=2$ (número de espiras) e $ns=50$ espiras, com seis termos da série de Fourier que compõe a onda quadrada.

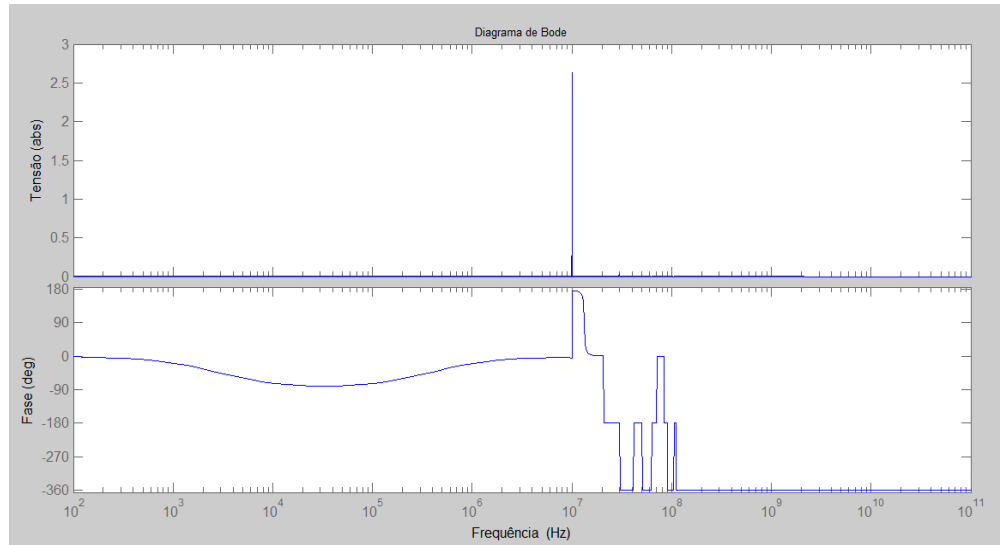


Figura 5.13 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e seis termos da série de Fourier.

Ainda para a terceira configuração se tem a resposta para $np=7$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco.

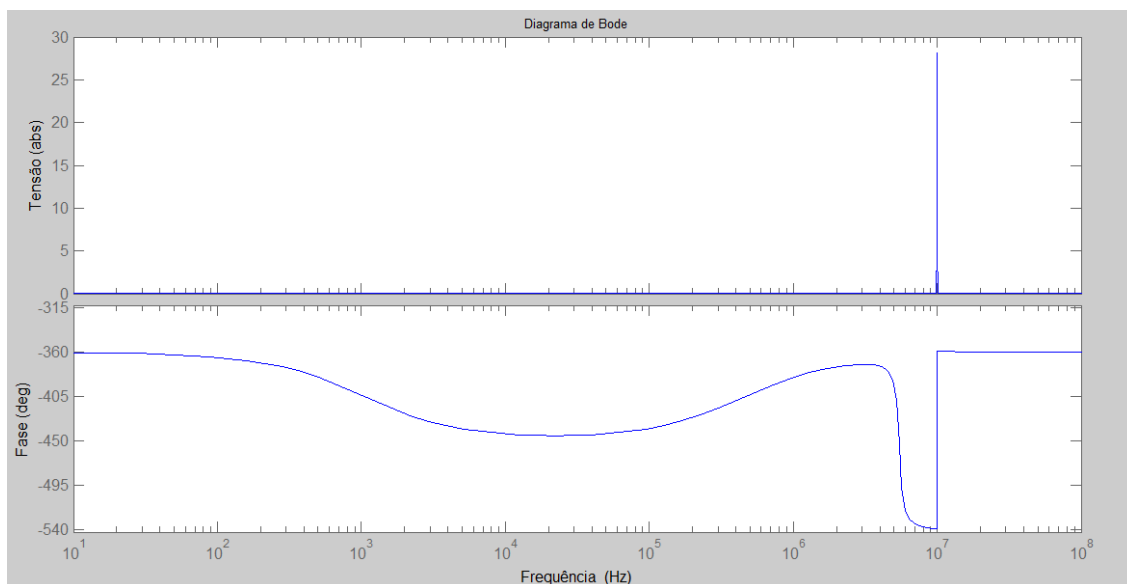


Figura 5.14 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $n_p=7$ (sete espiras em anel no primário do transformador e 50 espiras em disco no secundário) e com dois termos da série de Fourier se tem:

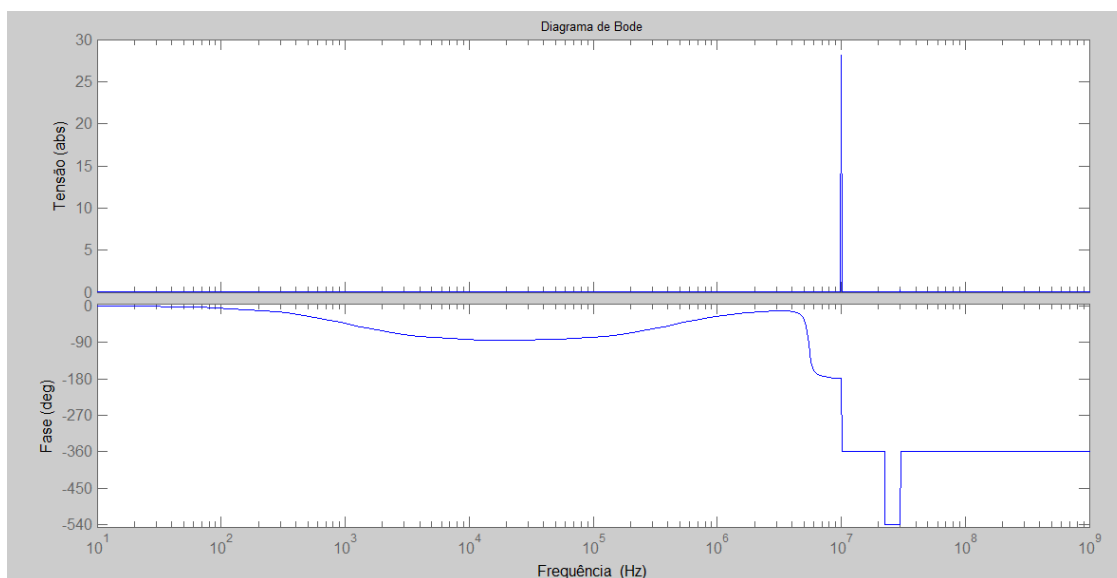


Figura 5.15 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e dois termos da série de Fourier.

Para $n_p=7$ espiras no primário em anel e $n_s=50$ espiras no secundário em disco, mas com o acréscimo de mais um termo na série de Fourier ficando três termos.

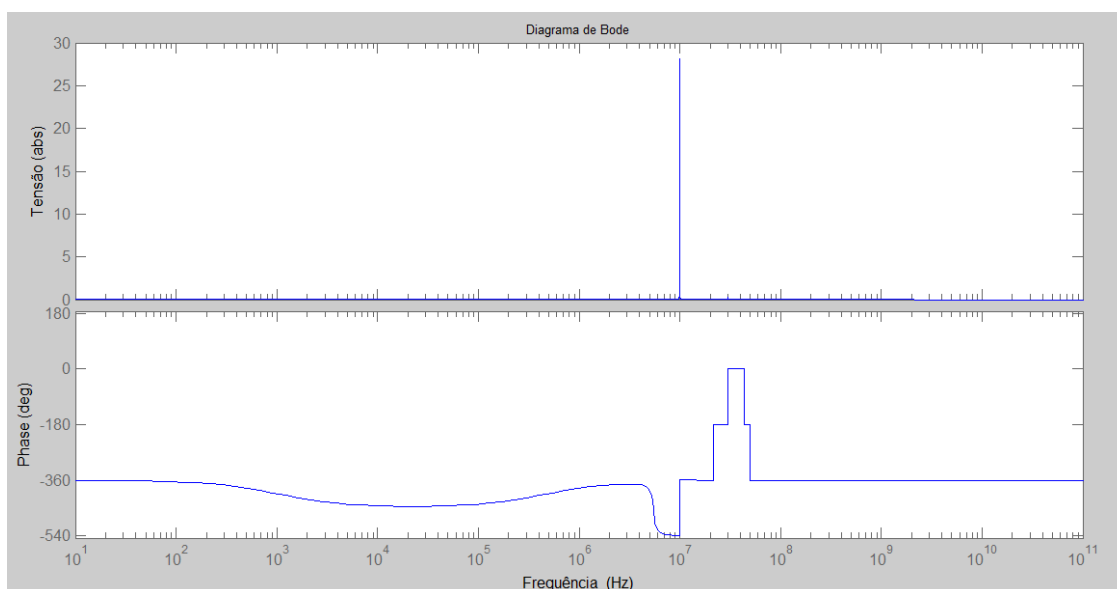


Figura 5.16 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e três termos da série de Fourier.

A Figura 5.17 mostra a resposta em frequência para $np=7$ espiras em anel \times $ns=50$ espiras em disco e seis termos da série de Fourier que compõe a onda quadrada apresentando um maior número de picos.

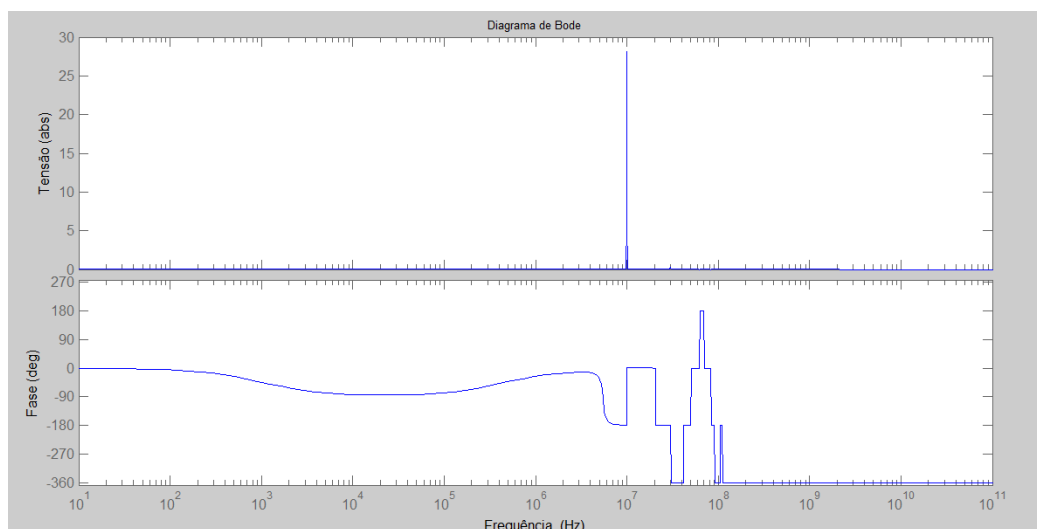


Figura 5.17 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e seis termos da série de Fourier.

Para 15 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco, com um termo da série de Fourier se tem:

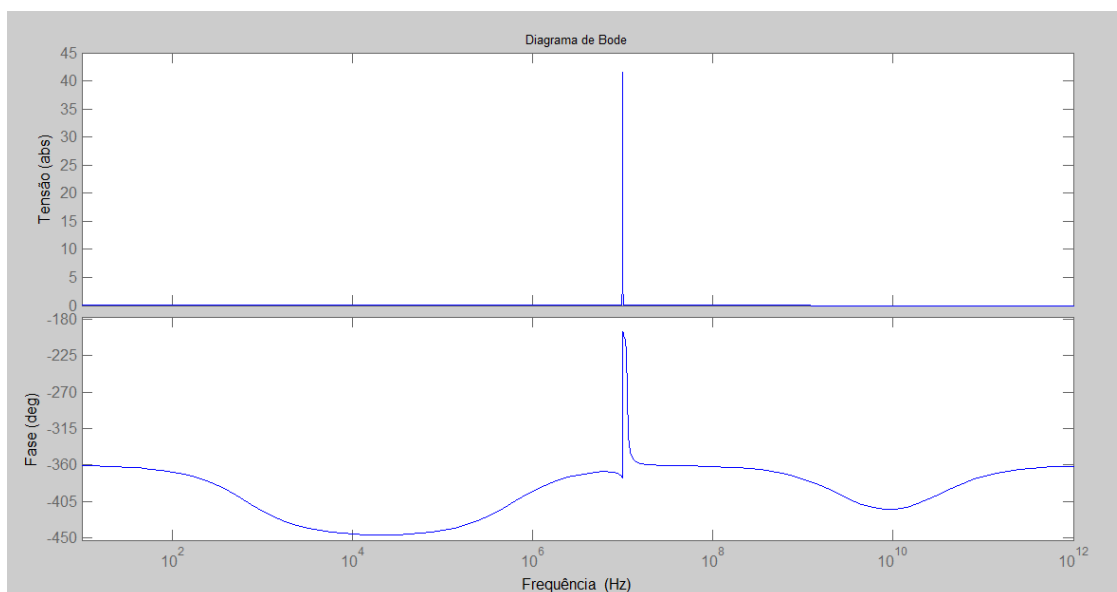


Figura 5.18 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $n_p=15$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e com dois termos da série de Fourier:

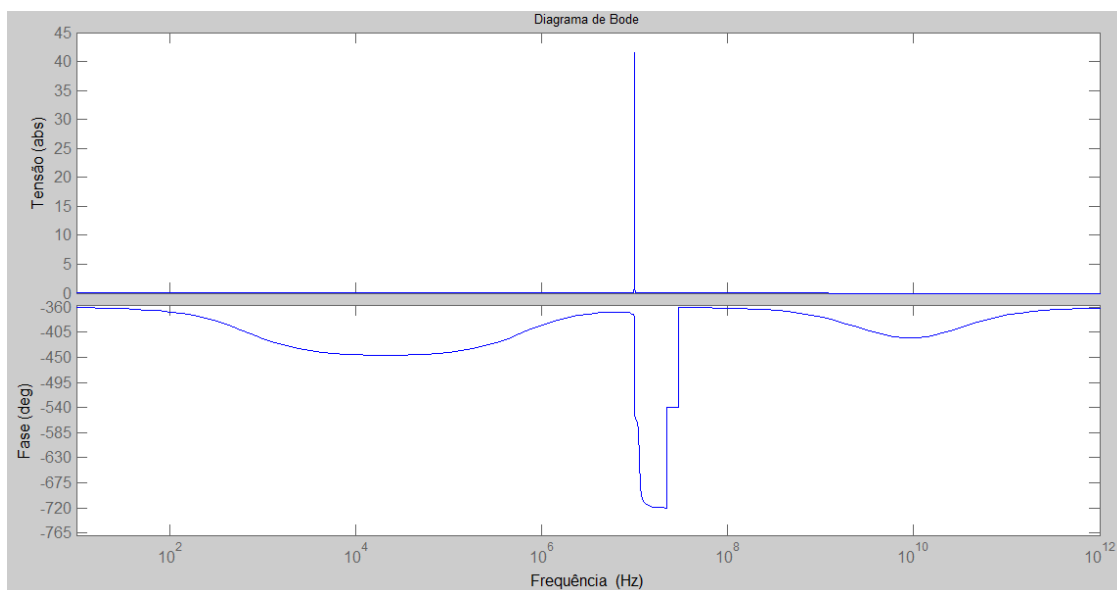


Figura 5.19 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e dois termos da série de Fourier.

Para $n_p= 15$ espiras em anel e $n_s= 50$ espiras em disco e com três termos da série de Fourier:

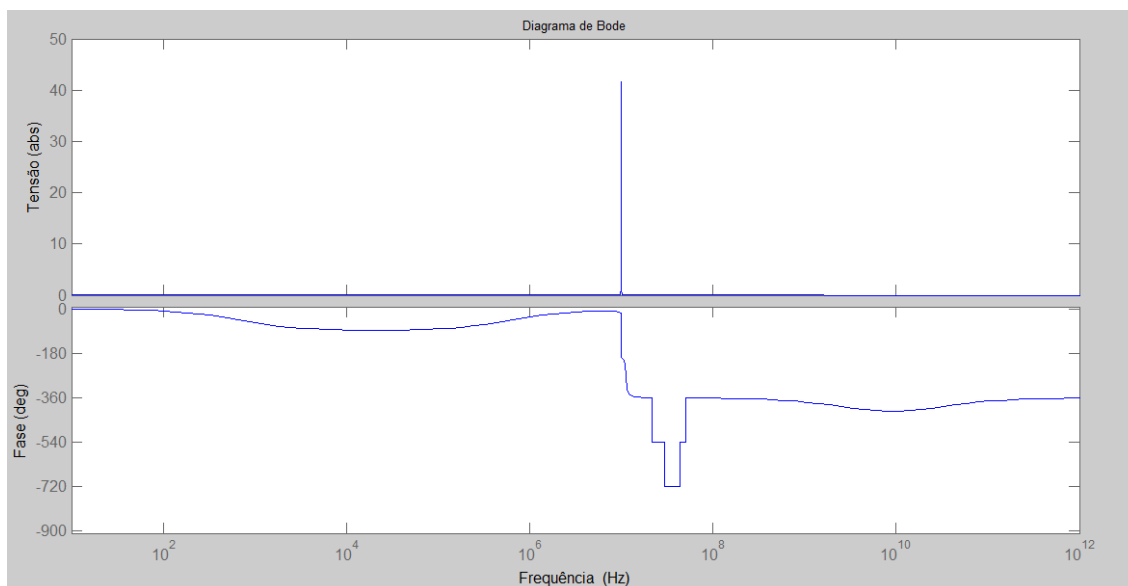


Figura 5.20 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e três termos da série de Fourier.

Para $n_p = 15$ espiras em anel e $n_s = 50$ espiras em disco e com seis termos da série de Fourier:

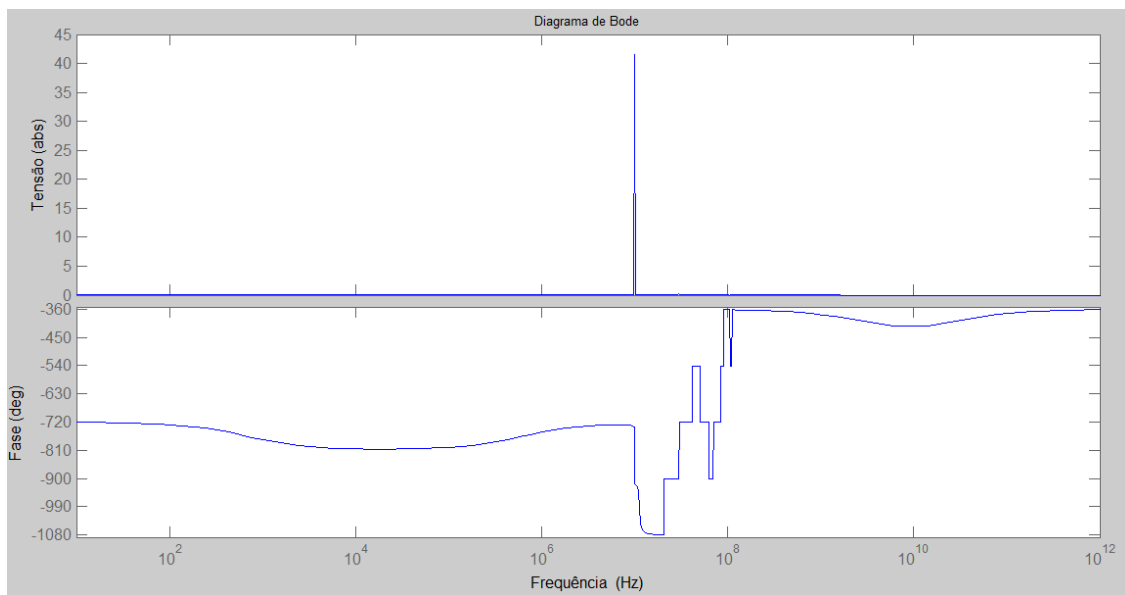


Figura 5.21 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e seis termos da série de Fourier.

Na Figura 5.22 se tem a resposta em frequência para 20 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco do transformador com apenas um termo da série de Fourier.

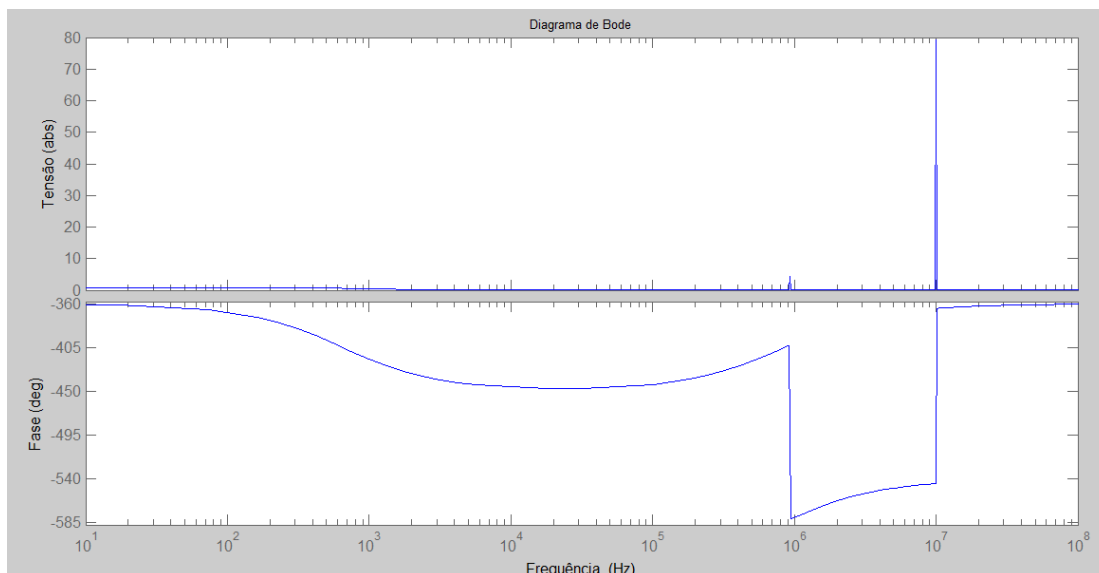


Figura 5.22 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e um termo da série de Fourier.

Para $n_p = 20$ espiras em anel e $n_s = 50$ espiras em disco e com dois termos da série de Fourier para onda quadrada:

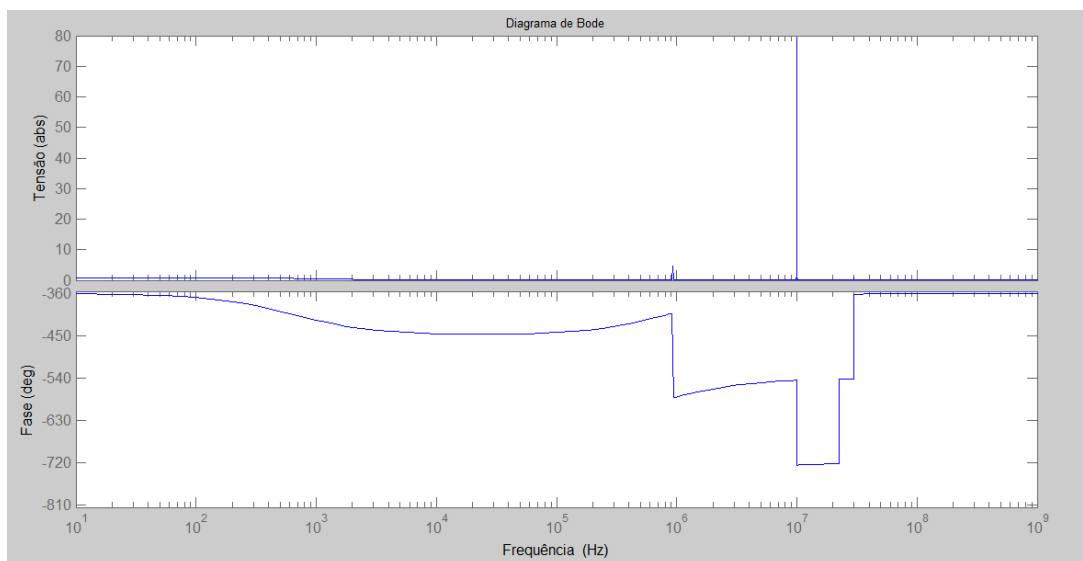


Figura 5.23 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.24 mostra a resposta para $n_p = 20$ em anel x $n_s = 50$ em disco e com três termos da série de Fourier.

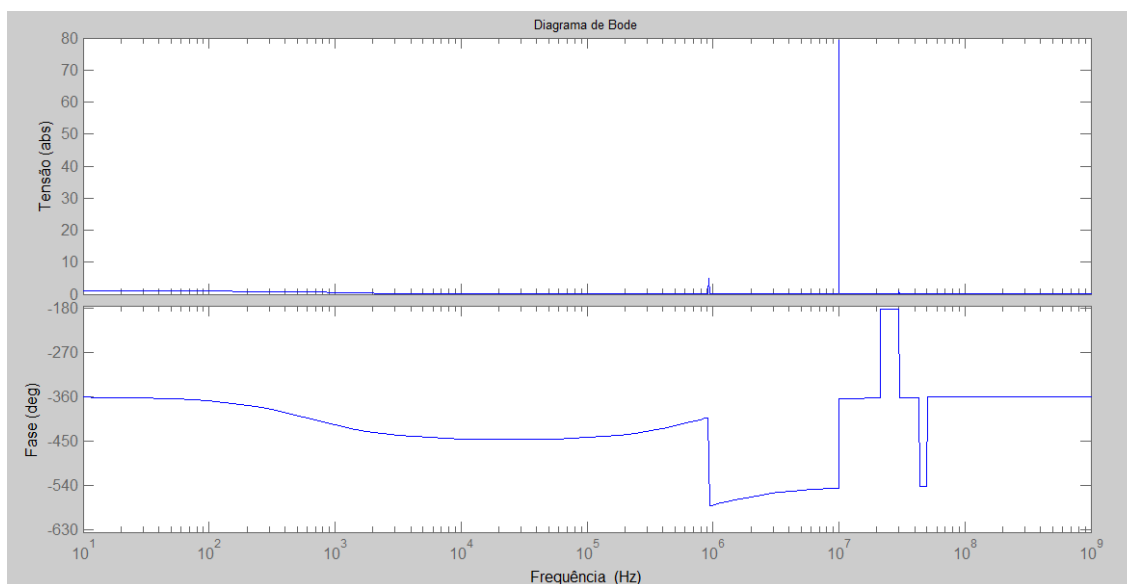


Figura 5.24 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e três termos da série de Fourier.

Na Figura 5.25 se tem a resposta para $n_p = 20$ espiras em anel x $n_s = 50$ espiras em disco do transformador de bobinas planas e seis termos da série de Fourier.

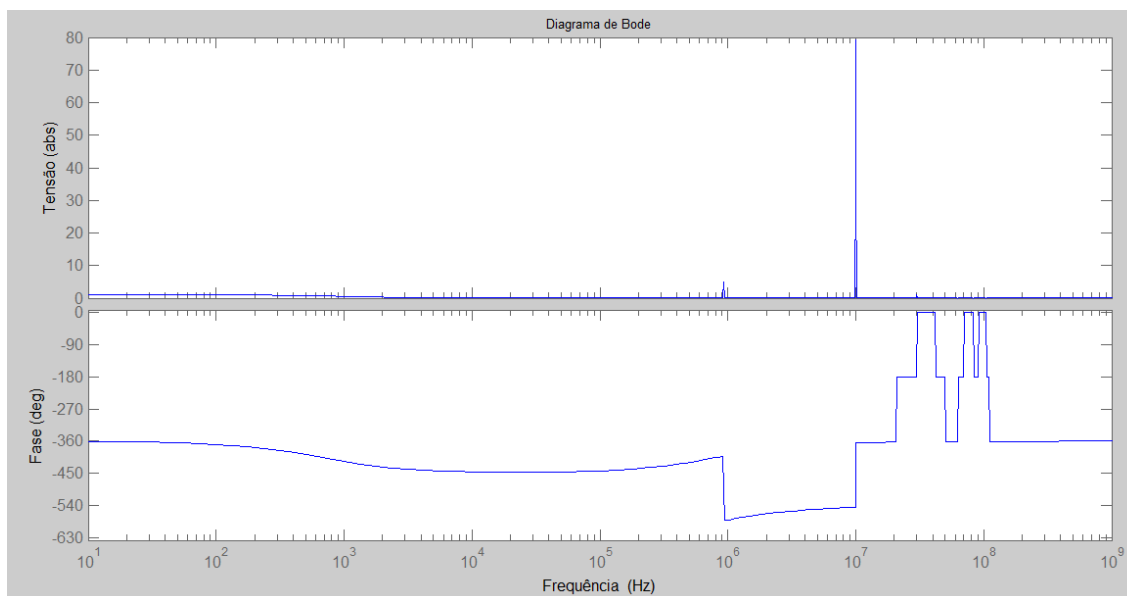


Figura 5.25 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $n_p = 30$ espiras em anel e $n_s = 50$ em disco e com um termo da série de Fourier que forma a onda quadrada se tem:

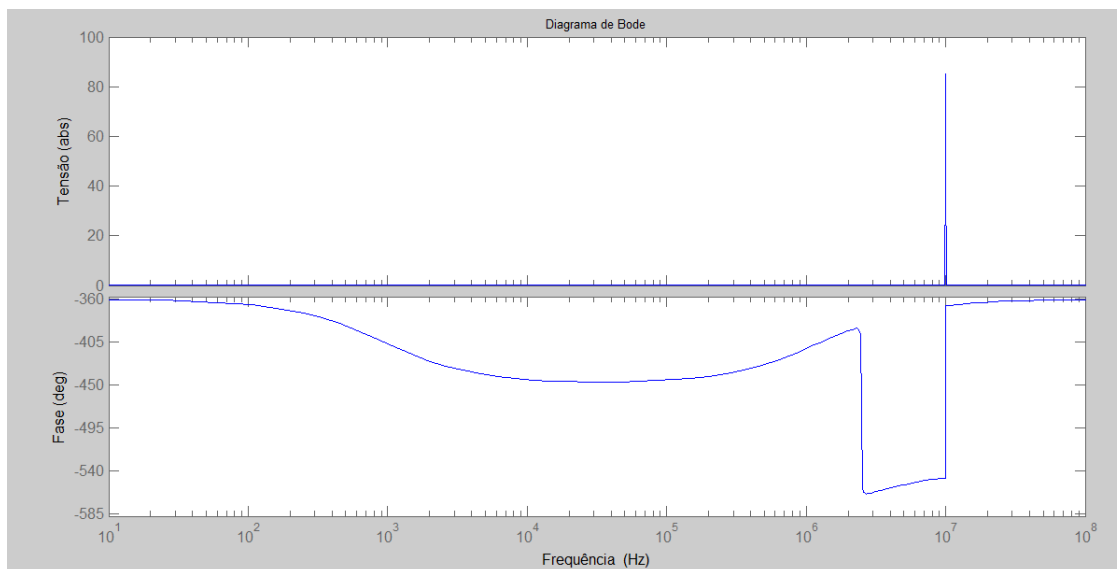


Figura 5.26 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $n_p = 30$ espiras em anel e $n_s = 50$ espiras em disco e dois termos da série de Fourier:

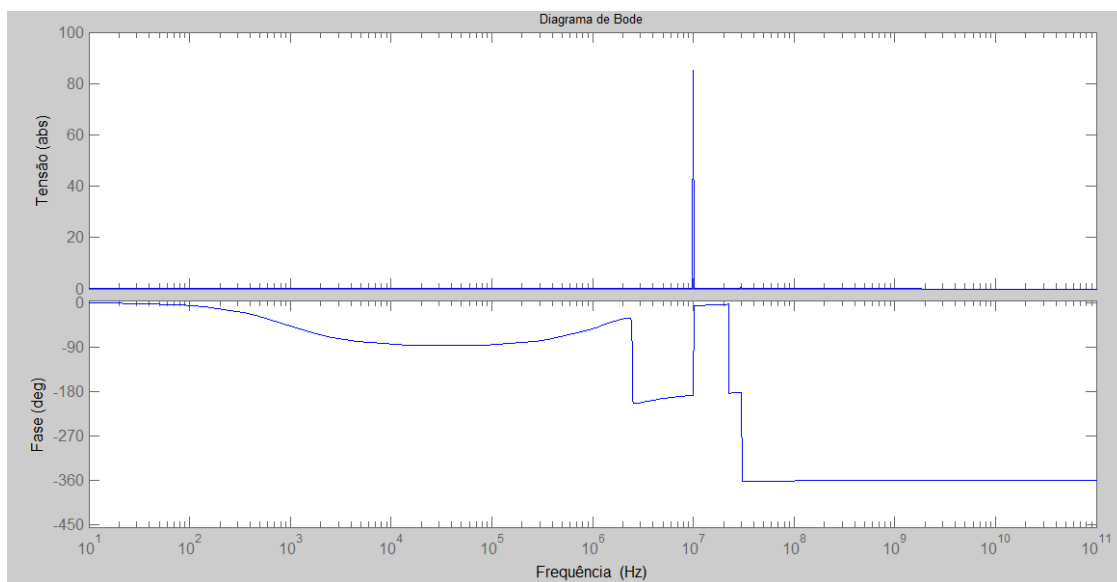


Figura 5.27 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e dois termos da série de Fourier.

Para o número de espiras igual a trinta em anel no primário e cinquenta em disco no secundário e com três senóides compondo a série de Fourier que forma a onda quadrada, se tem:

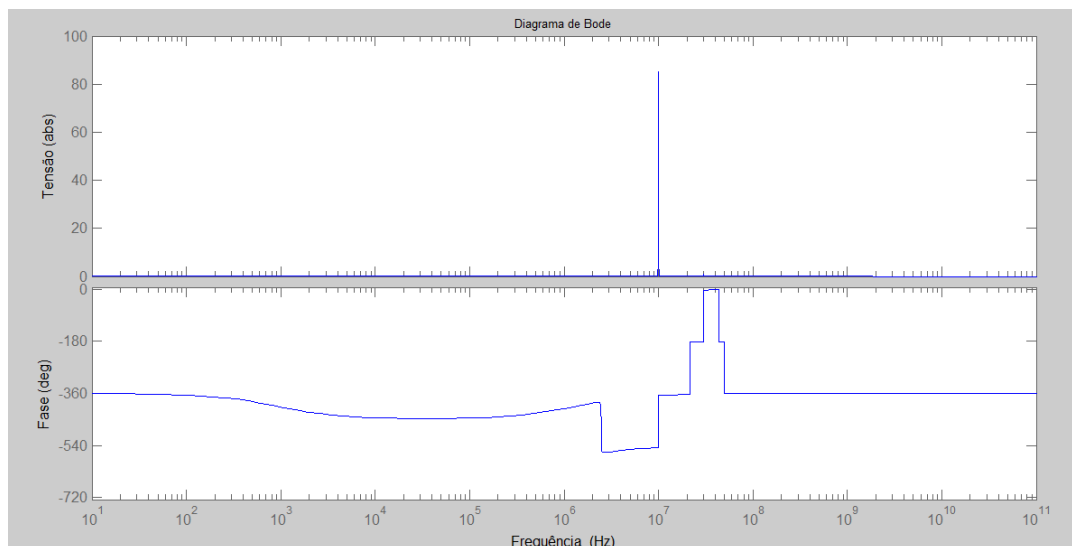


Figura 5.28 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e três termos da série de Fourier.

Para seis termos da série de Fourier tendo 30 espiras em anel no primário e 50 espiras em disco no secundário do transformador de bobinas planas, esse resultado está mostrado na Figura 5.29.

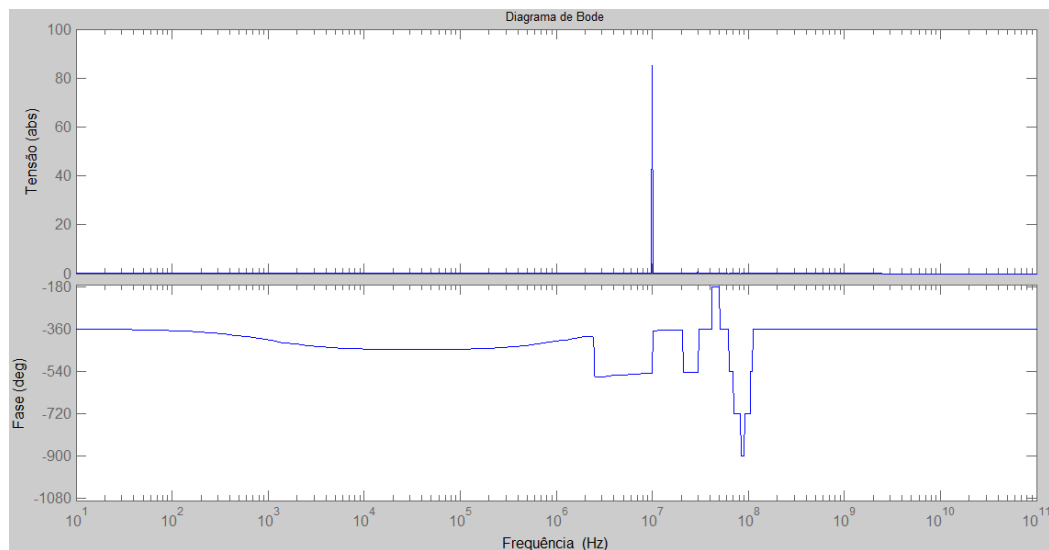


Figura 5.29 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e seis termos da série de Fourier.

A Figura 5.30 mostra a resposta para $n_p= 50$ espiras em anel e $n_s= 50$ espiras em disco do transformador e apenas um termo na série de Fourier.

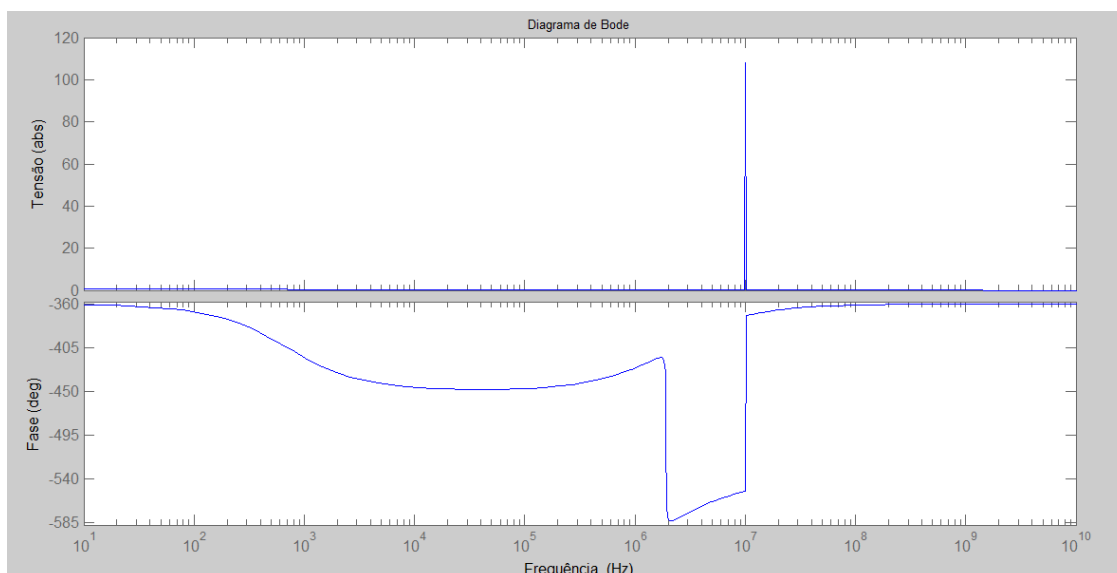


Figura 5.30 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $n_p = 50$ espiras em anel x $n_s = 50$ espiras em disco e com dois termos na série de Fourier:

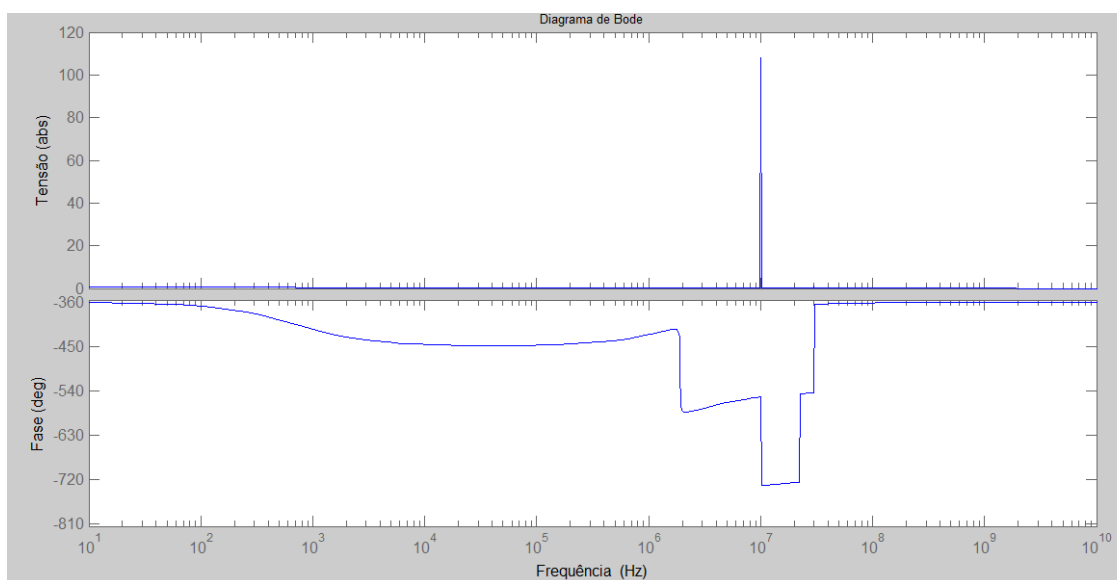


Figura 5.31 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e dois termos da série de Fourier.

Para cinquenta espiras em anel no primário e cinquenta espiras em disco no secundário e com três termos da série de Fourier:

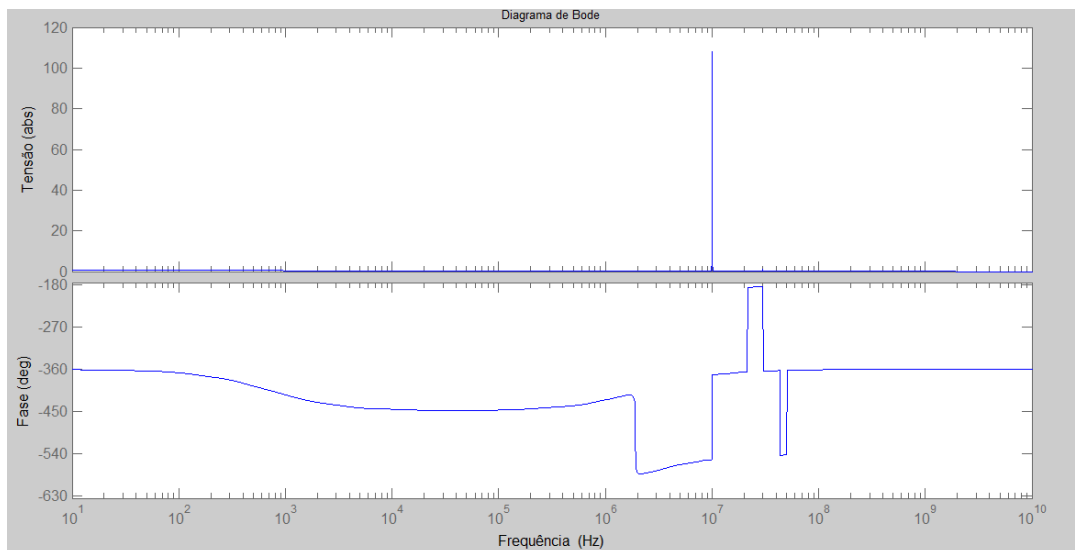


Figura 5.32 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.

E na Figura 5.33 se tem a resposta em frequência em que $n_p = 50$ espiras em anel x $n_s = 50$ espiras em disco e com o número de termos da série de Fourier é igual a seis.

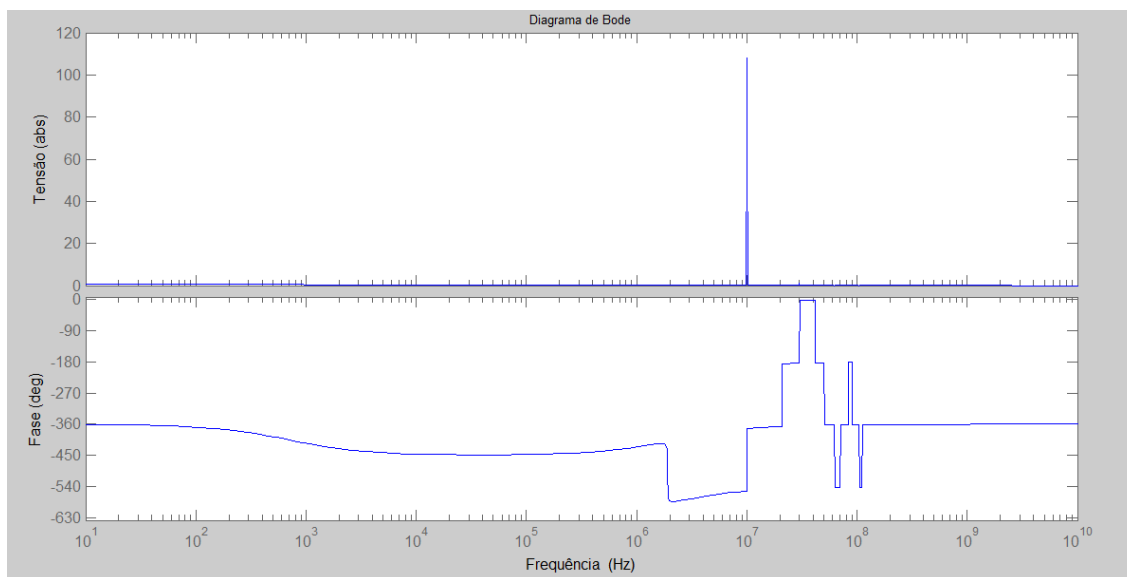


Figura 5.33 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e seis termos da série de Fourier.

Para finalizar a análise da terceira configuração do circuito equivalente proposto para o modelo do transformador de bobinas planas se simula a resposta em

frequência para o número de espiras igual a 200 espiras no secundário em disco e 50 espiras em anel no primário do transformador tendo inicialmente apenas o primeiro termo da série de Fourier, como de acordo com a Figura 5.34.

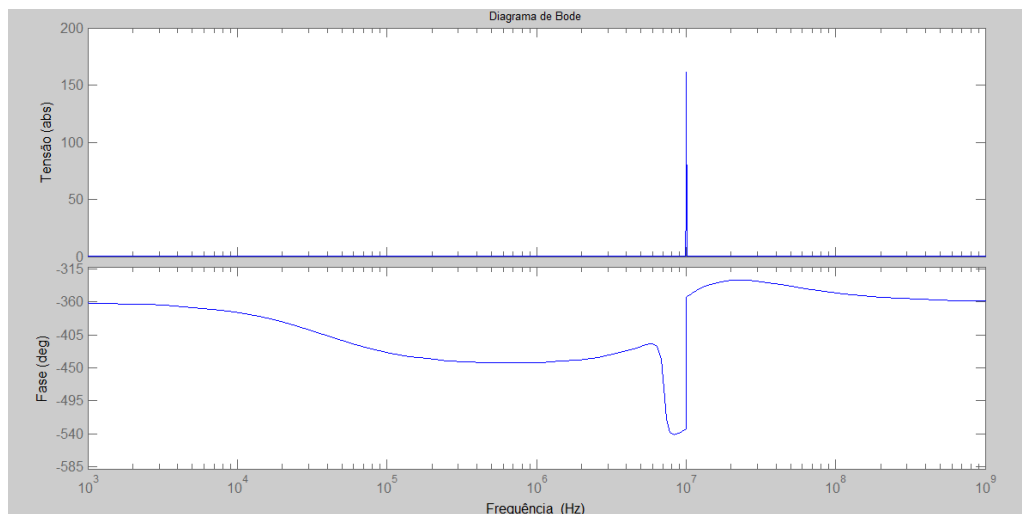


Figura 5.34 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $n_s=200$ espiras em disco x $n_p=50$ espiras em anel e dois termos para série de Fourier:

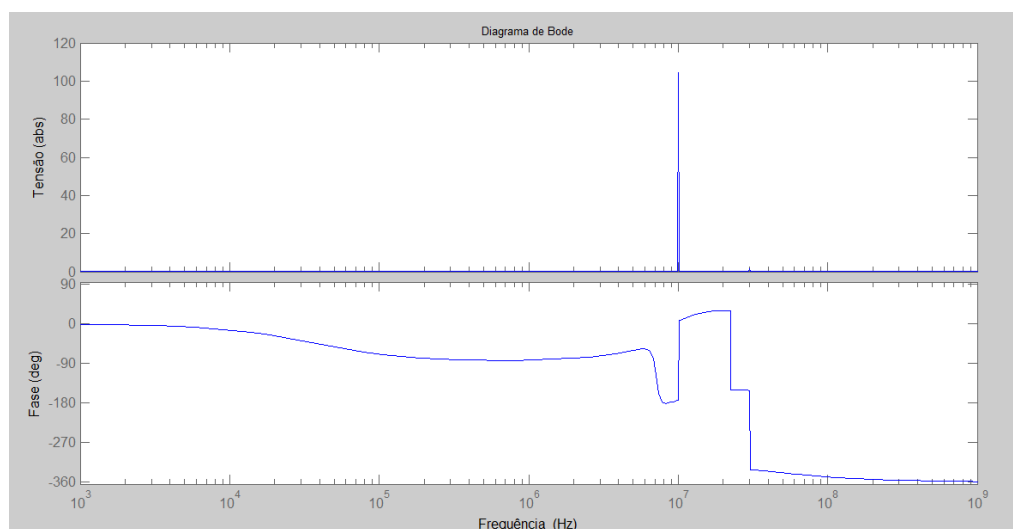


Figura 5.35 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.36 mostra a resposta em frequência para $ns=200$ espiras em disco x $np=50$ espiras em anel e com três termos da série de Fourier.

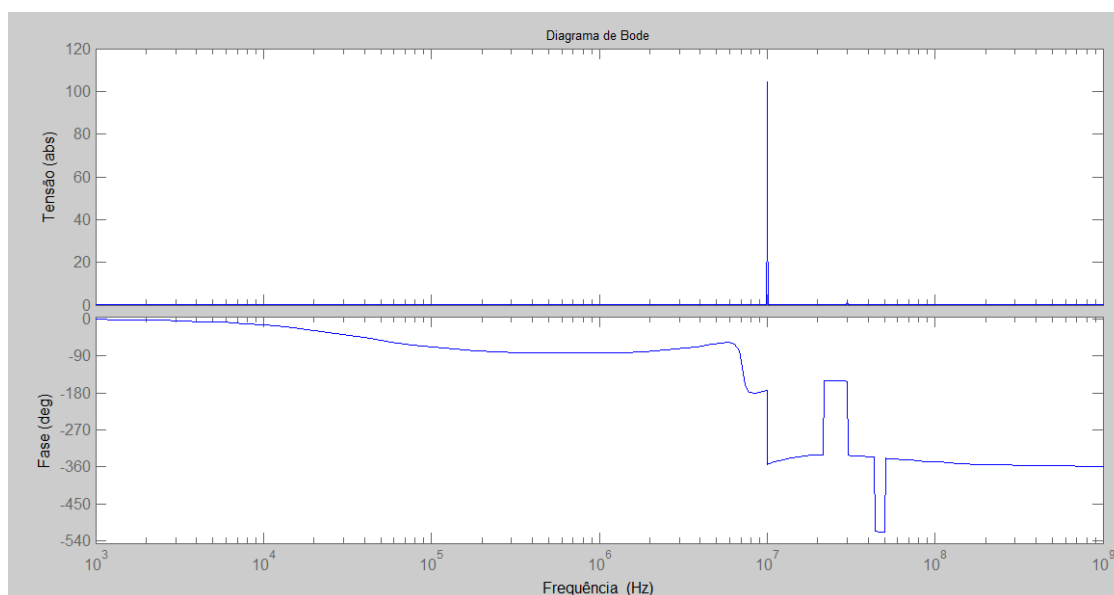


Figura 5.36 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e três termos da série de Fourier.

Para $ns=200$ espiras em disco e com seis termos da série de Fourier:

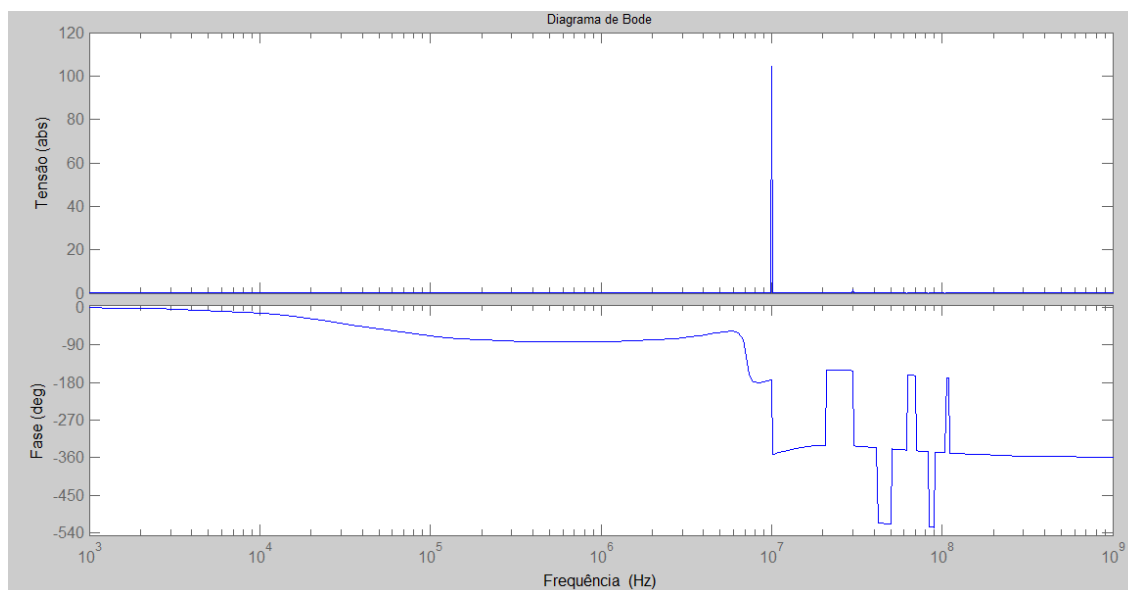


Figura 5.37 Resposta em frequência para a terceira configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e seis termos da série de Fourier.

É notável que ao acrescentar um senóide na série de Fourier há o surgimento de picos na resposta em frequência que está relacionado com o número de termos da série.

Para analisar o quarto circuito equivalente proposto como modelo para o transformador de bobinas planas simula-se o quarto circuito, para $n=2$ (número de espiras) e tendo apenas um termo da série de Fourier para que no final do trabalho de conclusão de curso se possa perceber quais dos modelos propostos melhor se aproximam das respostas obtidas experimentalmente.

Para o primeiro caso da quarta configuração se tem:

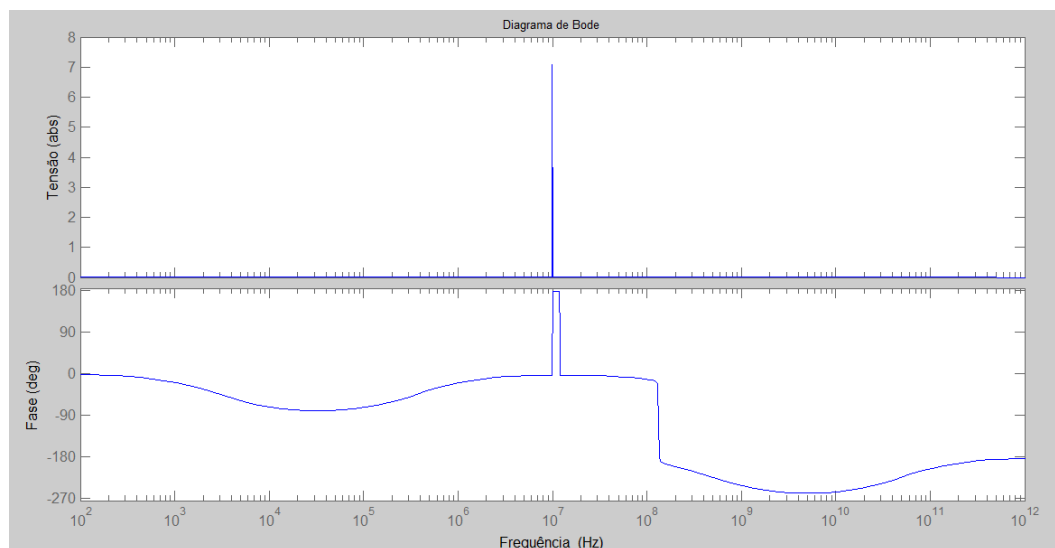


Figura 5.38 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e apenas um termo da série de Fourier.

Para $np= 2$ espiras em anel e $ns= 50$ em disco e com dois termos da série de Fourier:

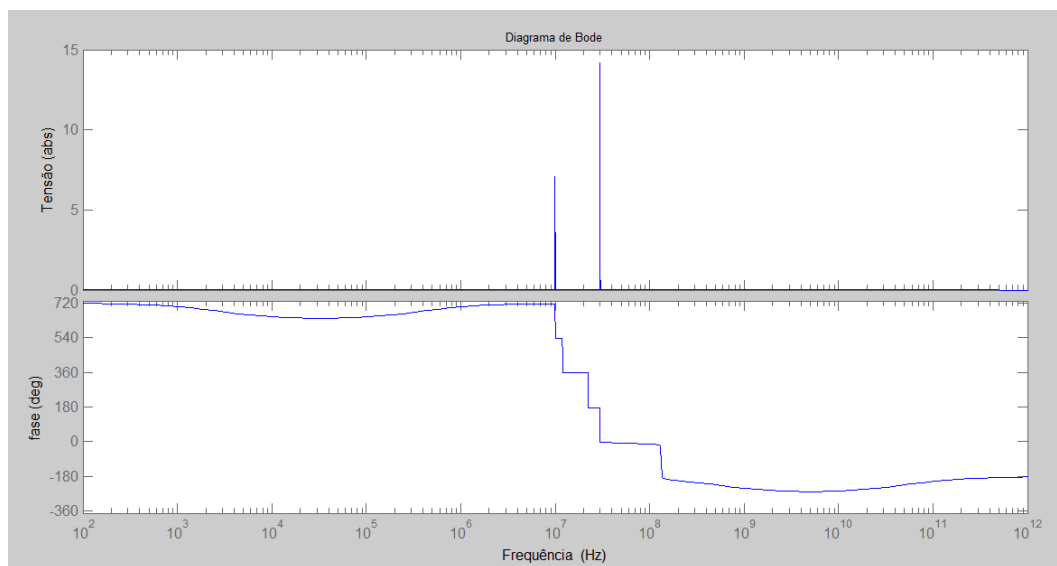


Figura 5.39 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.40 mostra a resposta para $np=2$ espiras anel e $ns=50$ espiras em disco e com três termos da série de Fourier.

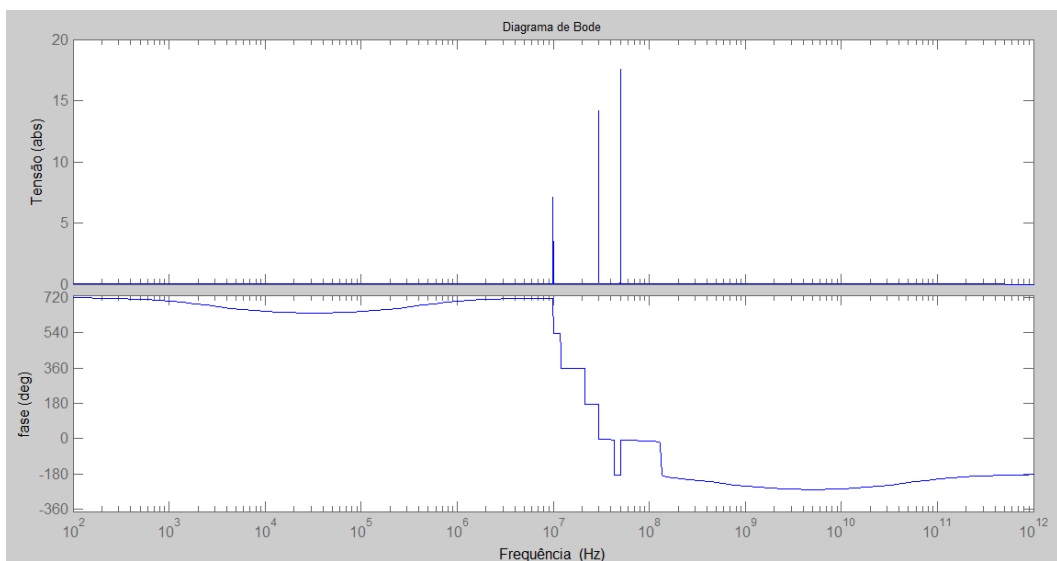


Figura 5.40 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e três termos da série de Fourier.

Para $n_p=2$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e com seis termos de Fourier:

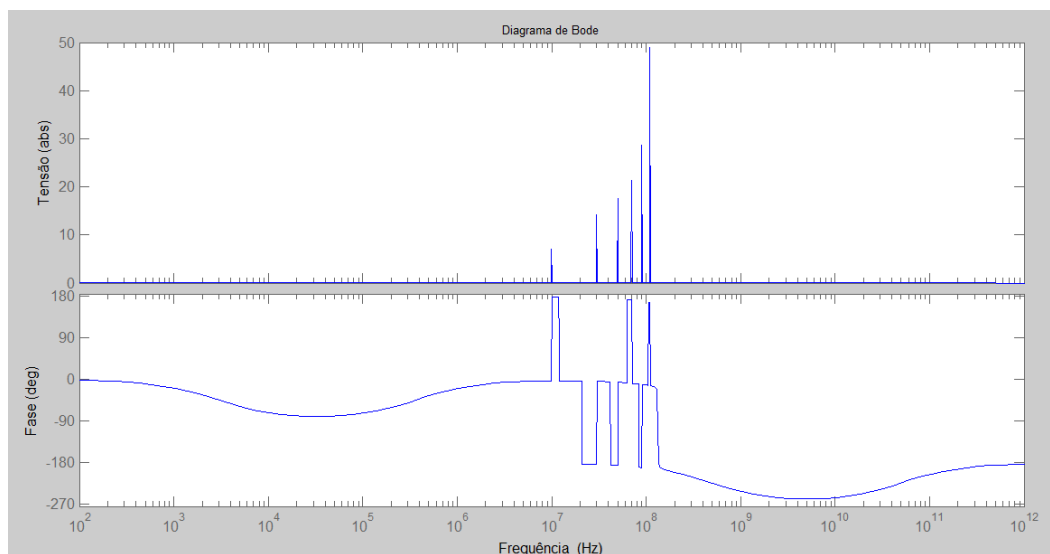


Figura 5.41 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duas espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $n_p=7$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e com apenas um termo da série de Fourier:

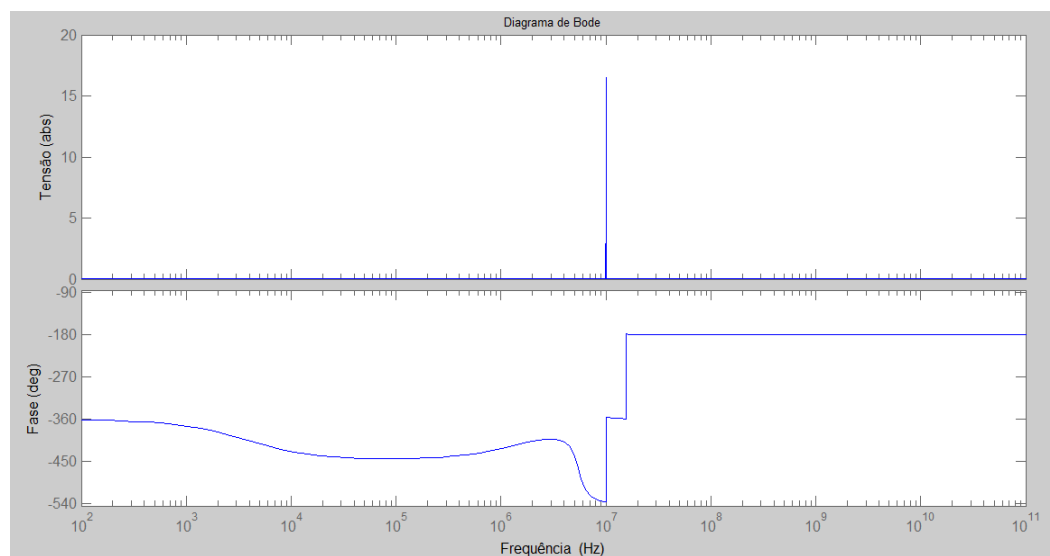


Figura 5.42 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e um termo da série de Fourier.

Para $np=7$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e com dois termos da série de Fourier:

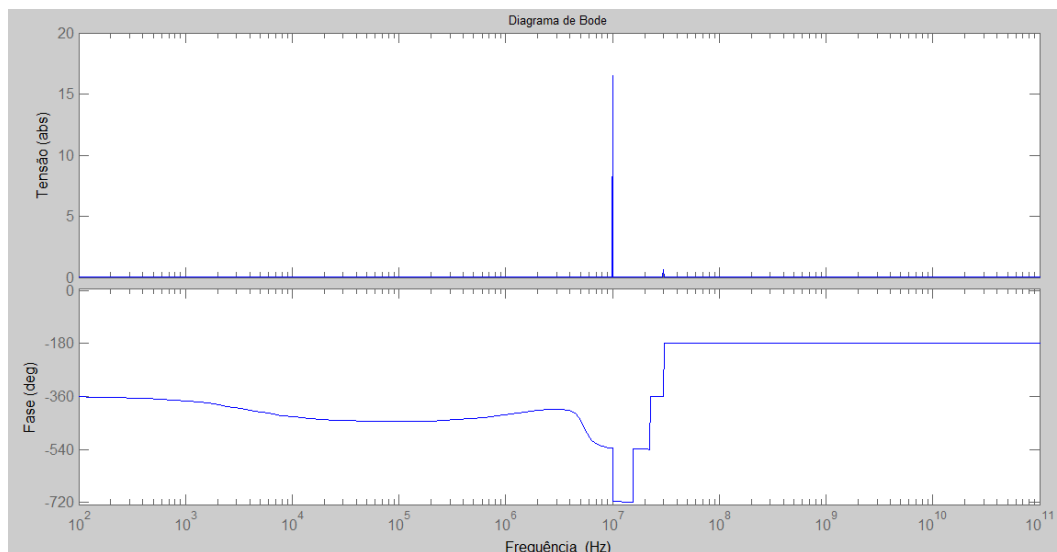


Figura 5.43 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.44 mostra a resposta para $np=7$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e com três termos da série de Fourier.

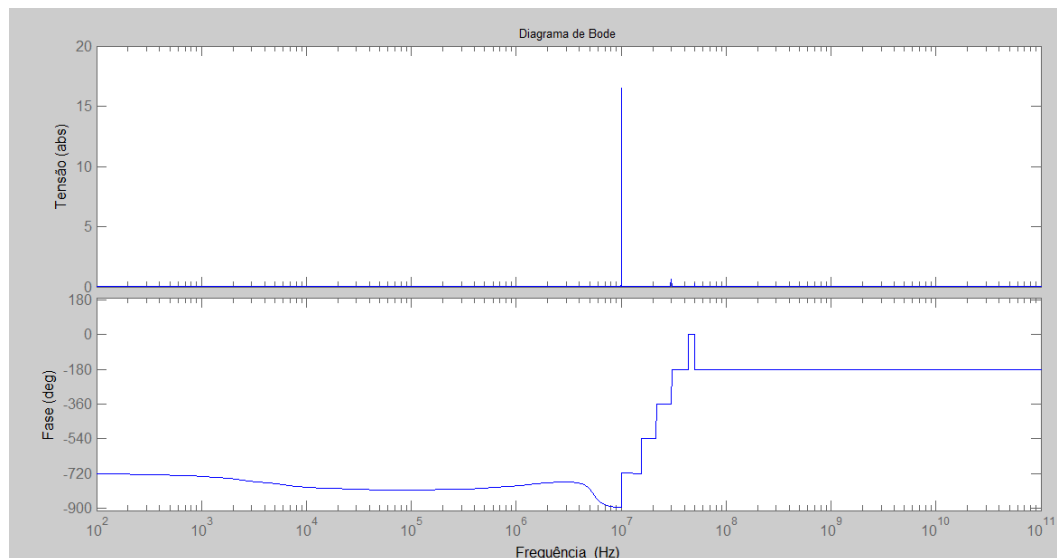


Figura 5.44 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e três termos da série de Fourier.

Na Figura 5.45 têm-se a resposta em frequência para $np=7$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e com seis termos da série trigonométrica de Fourier.

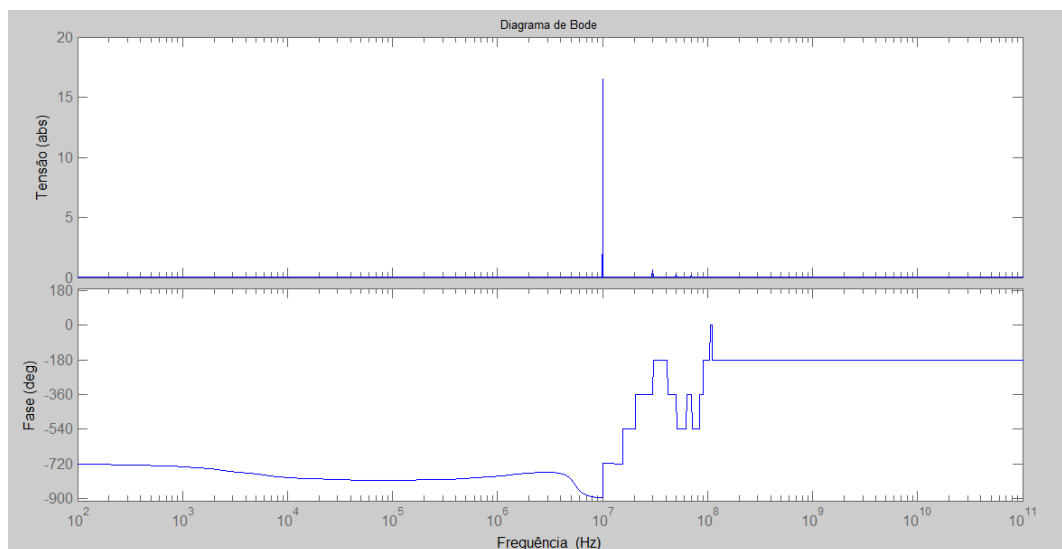


Figura 5.45 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há sete espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $np=15$ espiras em anel e $ns=50$ em disco e com um termo da série de Fourier:

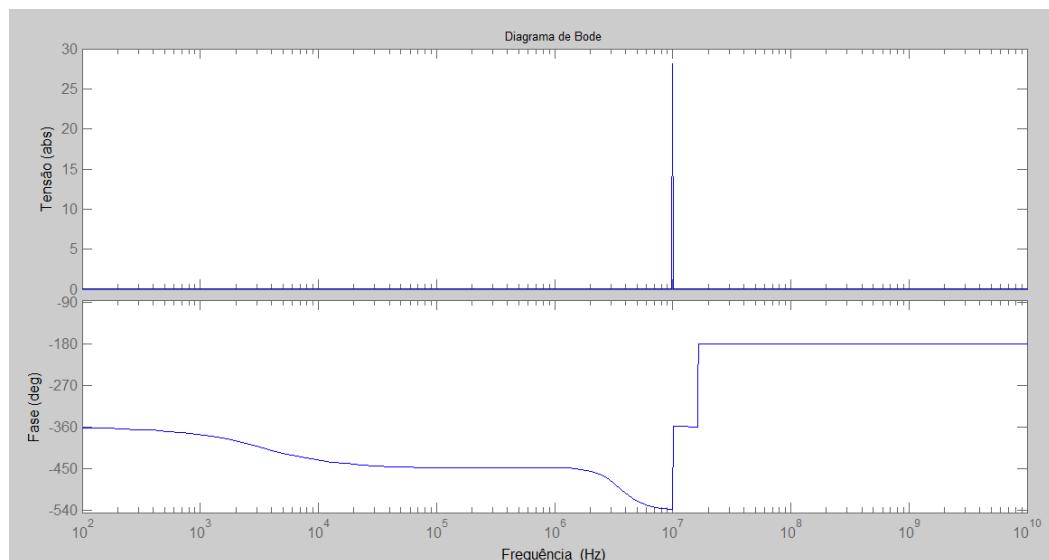


Figura 5.46 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e um termo da série de Fourier.

Para $np=15$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e com dois termos da série de Fourier:

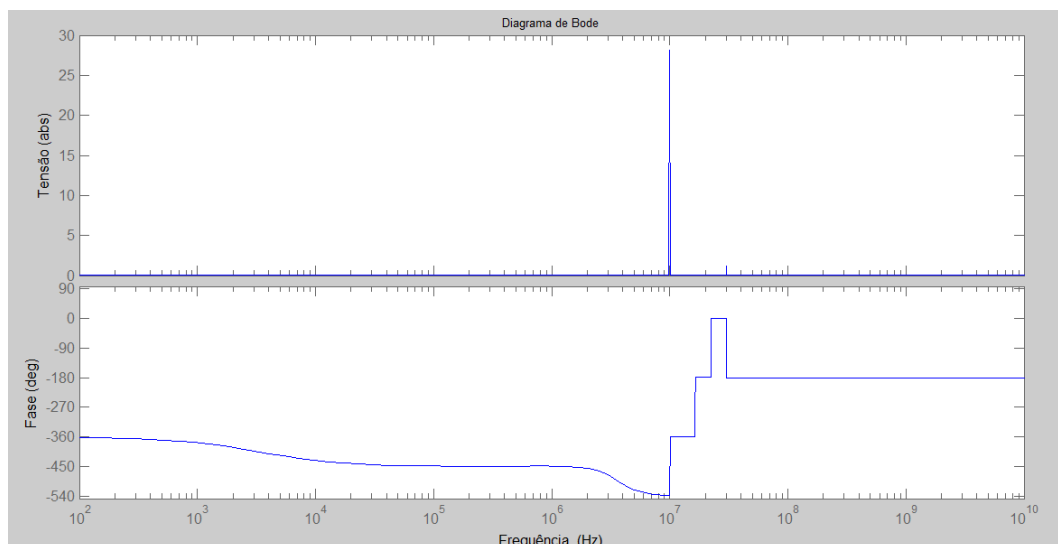


Figura 5.47 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze bobinas e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.48 mostra a resposta para $np= 15$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e para três termos da série de Fourier.

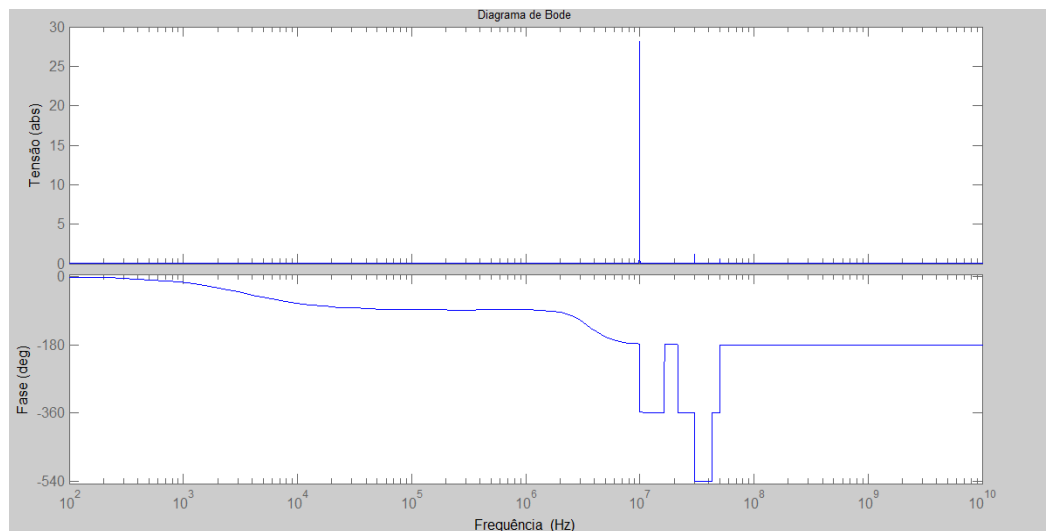


Figura 5.48 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e três termos da série de Fourier.

Para 15 espiras no primário em anel do transformador e seis termos da série de Fourier, se tem:

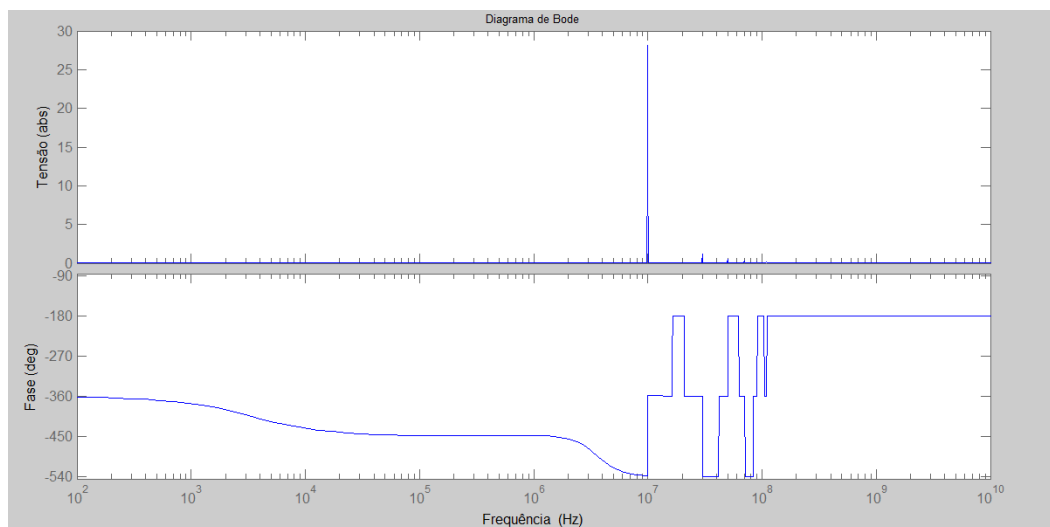


Figura 5.49 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há quinze espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $n_p=20$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco do transformador e para apenas um termo da série de Fourier, se tem:

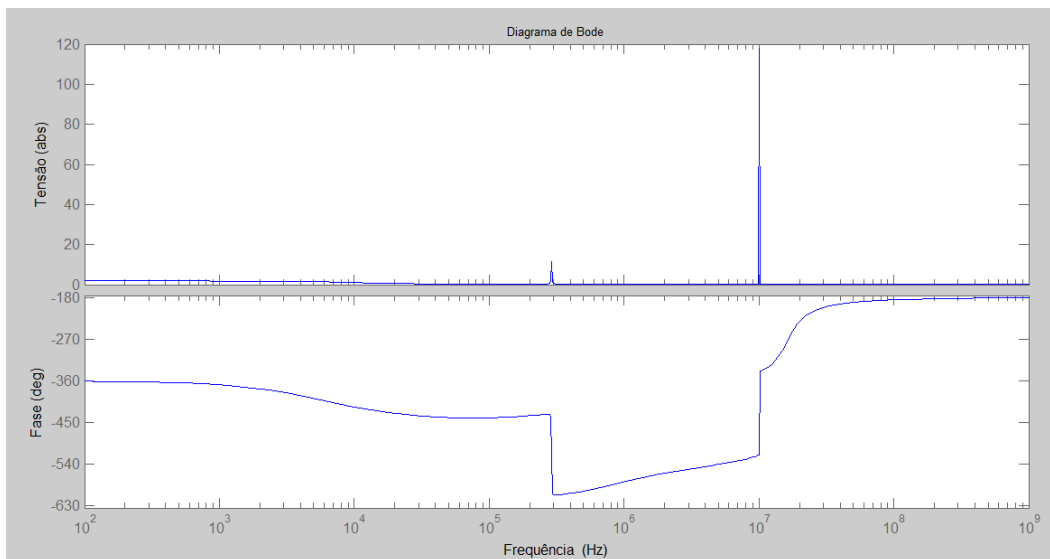


Figura 5.50 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e um termo da série de Fourier.

Para $np=20$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e com dois termos da série de Fourier:

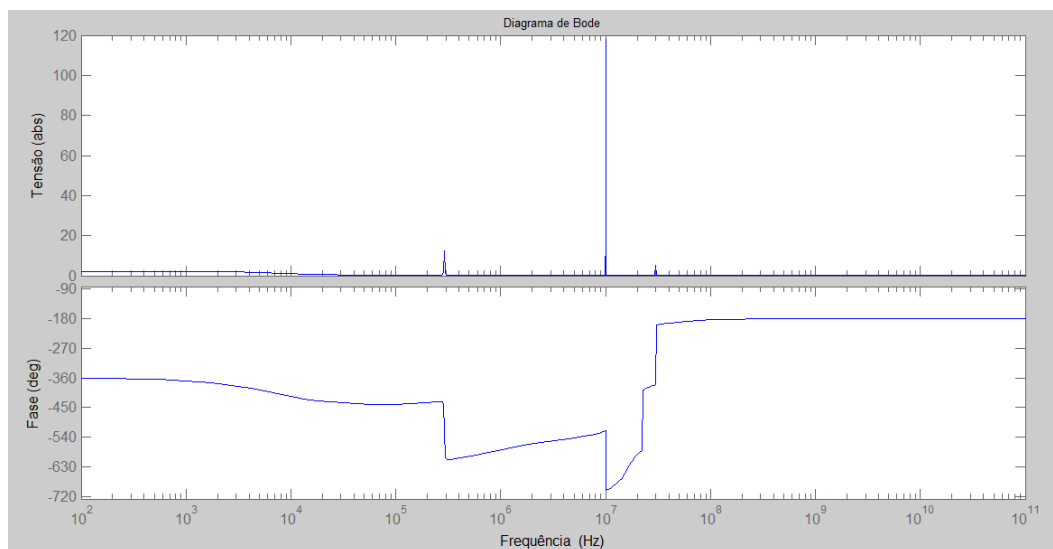


Figura 5.51 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.52 mostra a resposta para $np=20$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e para três termos da série de Fourier.

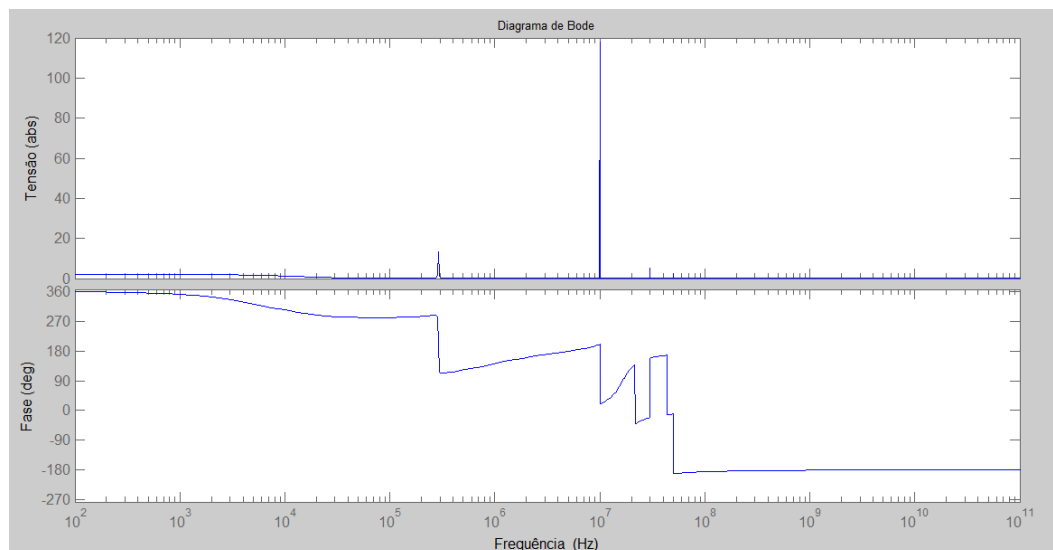


Figura 5.52 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e três termos da série de Fourier.

Para $n_p=20$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e seis termos da série de Fourier:

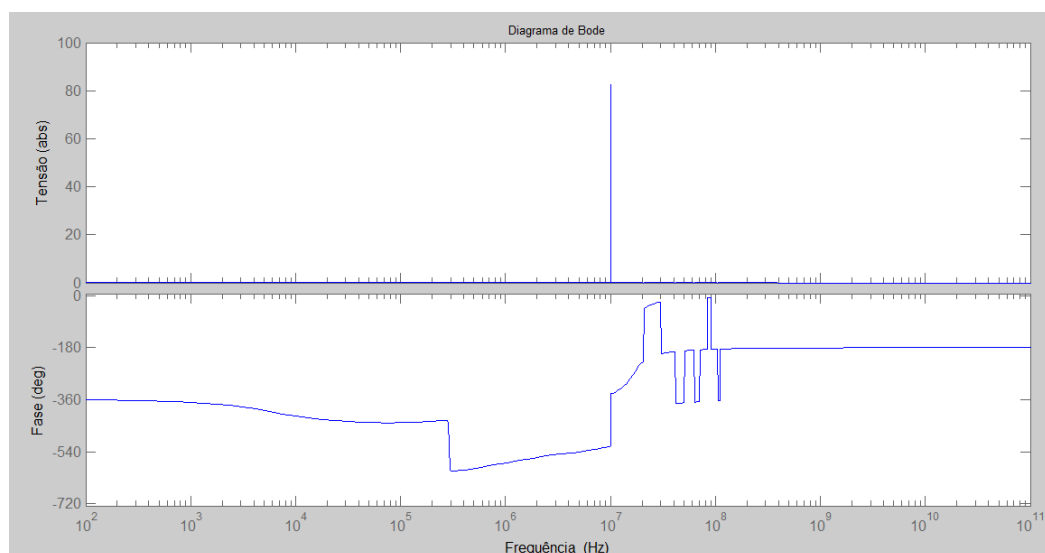


Figura 5.53 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há vinte espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $n_p=30$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e com um termo da série de Fourier:

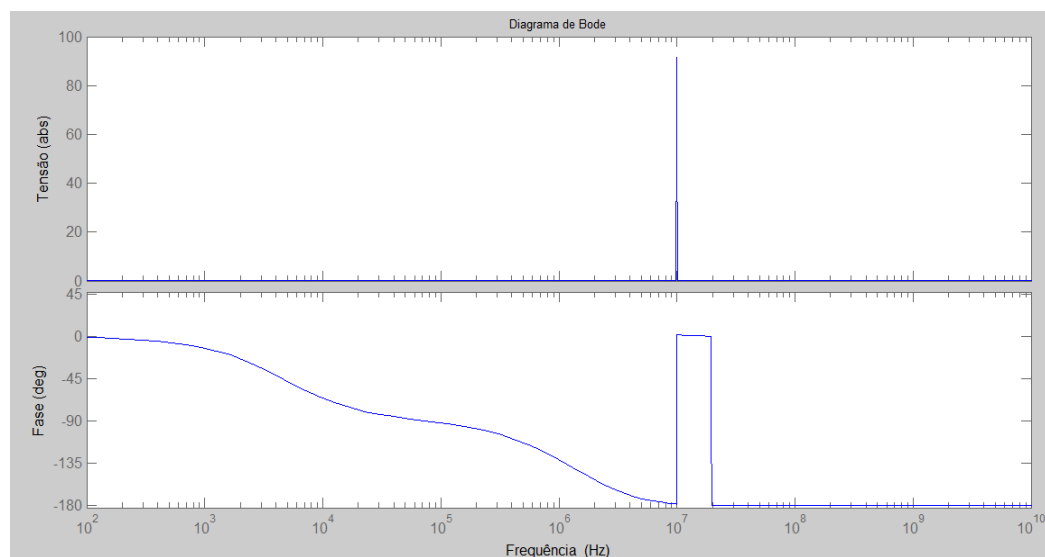


Figura 5.54 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e um termo da série de Fourier.

A Figura 5.55 mostra a resposta em frequência para $np=30$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco contendo apenas dois termos da série trigonométrica de Fourier:

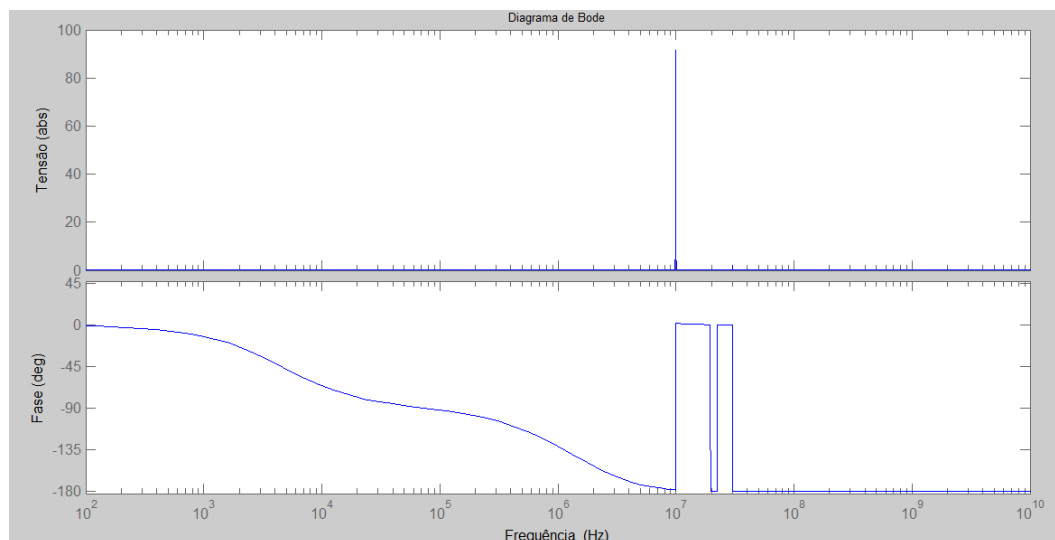


Figura 5.55 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e dois termos da série de Fourier.

Na Figura 5.56 se têm a resposta para $np=30$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e três componentes da série de Fourier.

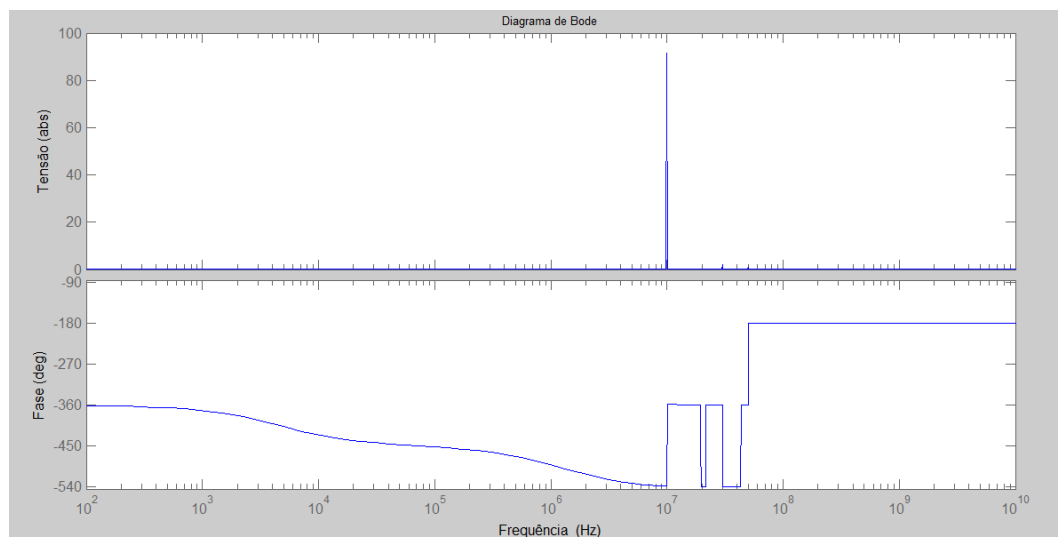


Figura 5.56 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e três termos da série de Fourier.

Na Figura 5.57 há a resposta quando $np=30$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e há seis termos na série de Fourier.

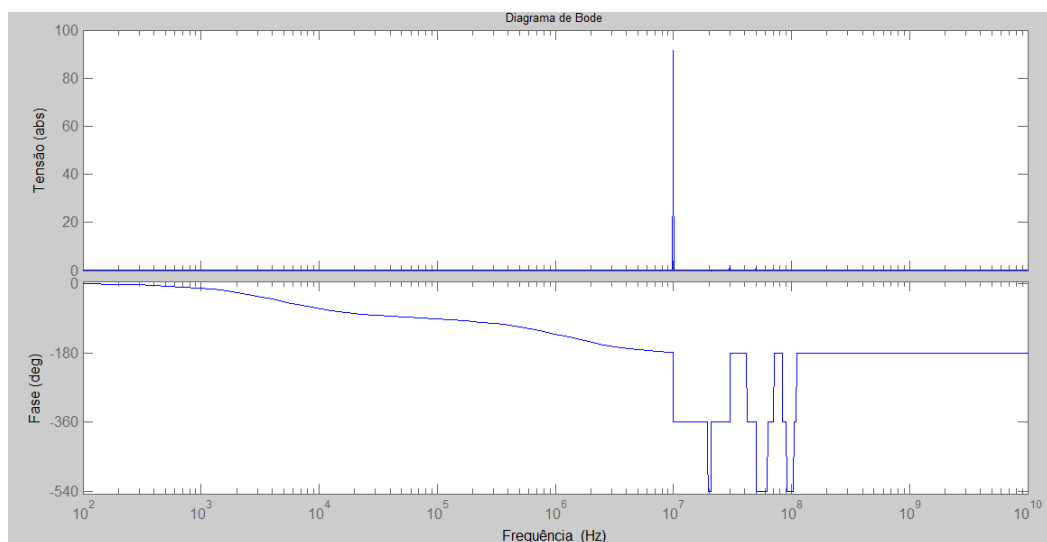


Figura 5.57 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há trinta espiras e seis termos da série de Fourier.

Para $np=50$ espiras em anel e $ns=50$ espiras em disco e um termo para série de Fourier:

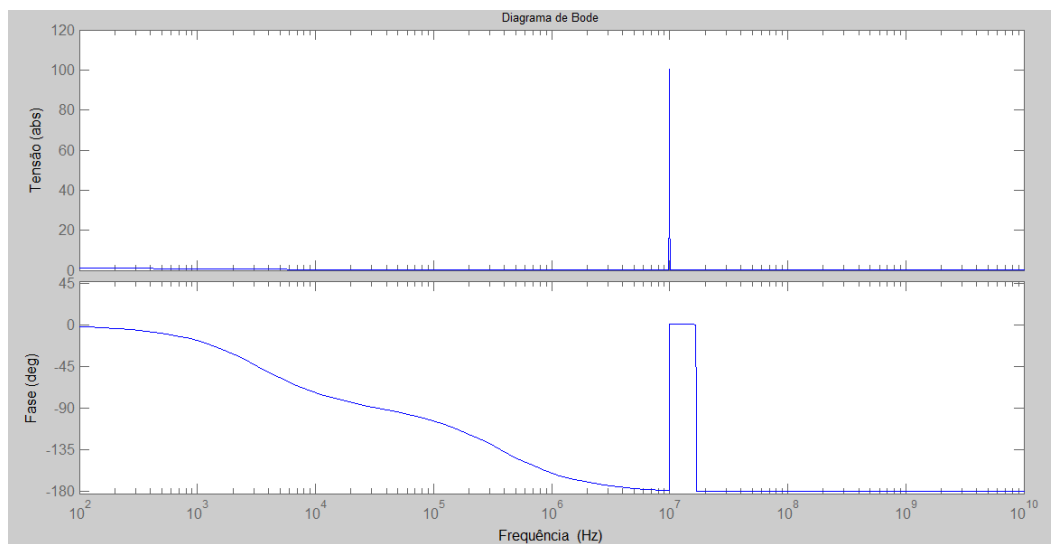


Figura 5.58 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e um termo da série de Fourier.

Para $n_p=50$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e dois termos para a série de Fourier:

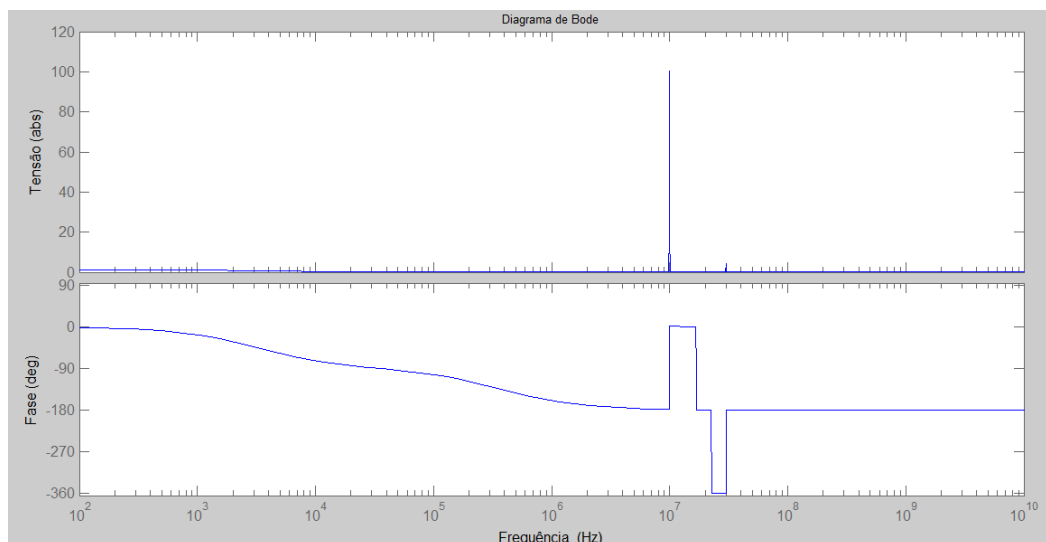


Figura 5.59 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e dois termos da série de Fourier.

A Figura 5.60 mostra a resposta em frequência para $n_p=50$ espiras em anel e $n_s=50$ espiras em disco e para três termos da série.

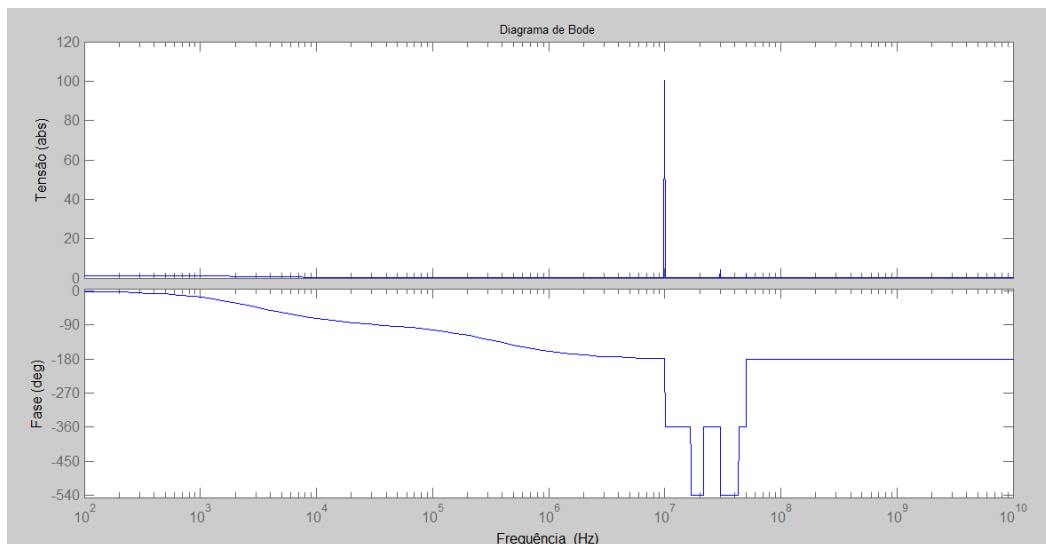


Figura 5.60 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.

Na Figura 5.61 há a resposta em frequência do sistema quando o transformador apresenta $n_p = 50$ espiras em anel e $n_s = 50$ espiras em disco e seis termos da série de Fourier.

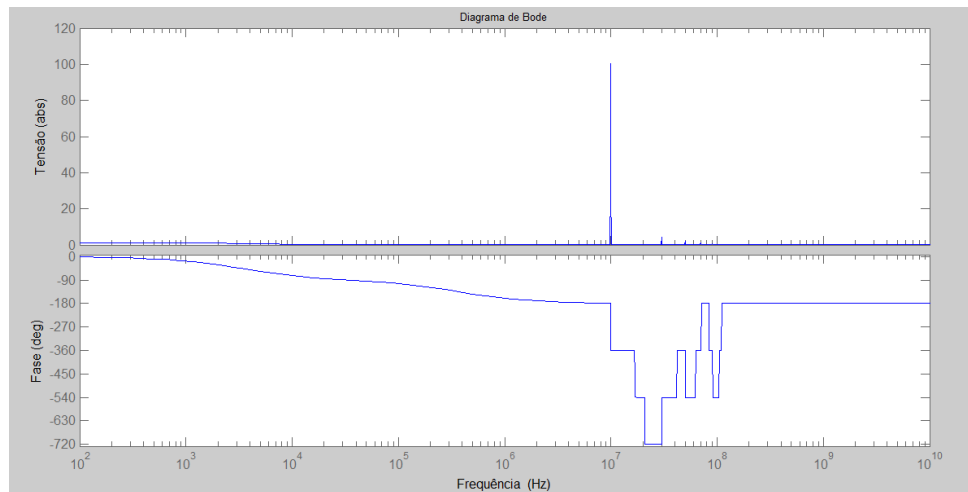


Figura 5.61 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há cinquenta espiras e três termos da série de Fourier.

Para finalizar a simulação dos circuitos equivalentes basta fazer a simulação para o número de espiras igual a duzentos, como será mostrado a seguir.

Para $n_s = 200$ espiras em disco e $n_p = 50$ espiras em anel e apenas um termo da série de Fourier se tem:

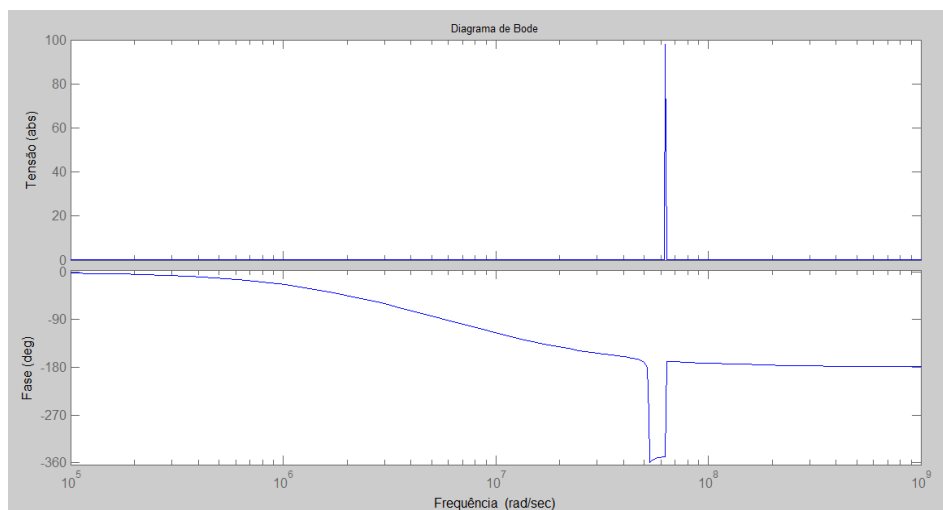


Figura 5.62 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e um termo da série de Fourier.

Para $ns=200$ espiras em disco e $np=50$ espiras em anel e dois termos da série de Fourier:

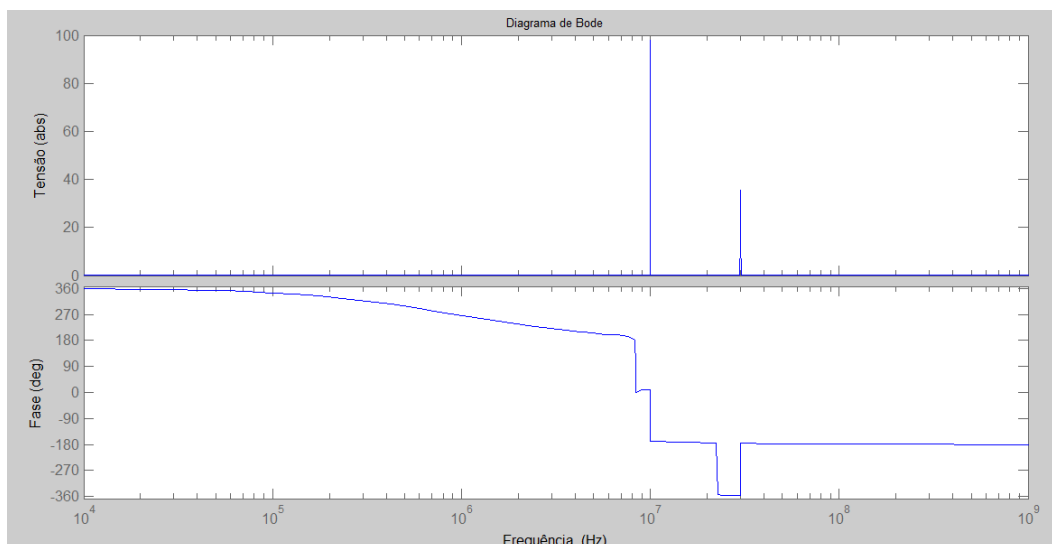


Figura 5.63 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e dois termos da série de Fourier.

Na Figura 5.64 há a resposta em frequência para o transformador com $ns=200$ espiras em disco e $np=50$ espiras em anel e três componentes da série de Fourier.

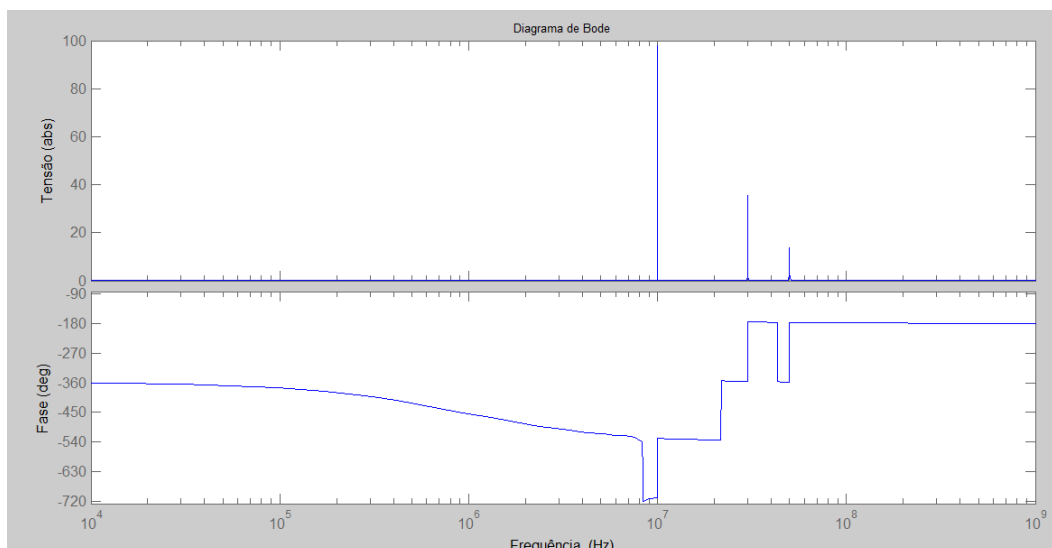


Figura 5.64 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e três termos da série de Fourier.

E por último se tem a resposta para $ns=200$ espiras em disco e $np=50$ espiras em anel e seis termos da série trigonométrica de Fourier de acordo com a Figura 5.65.

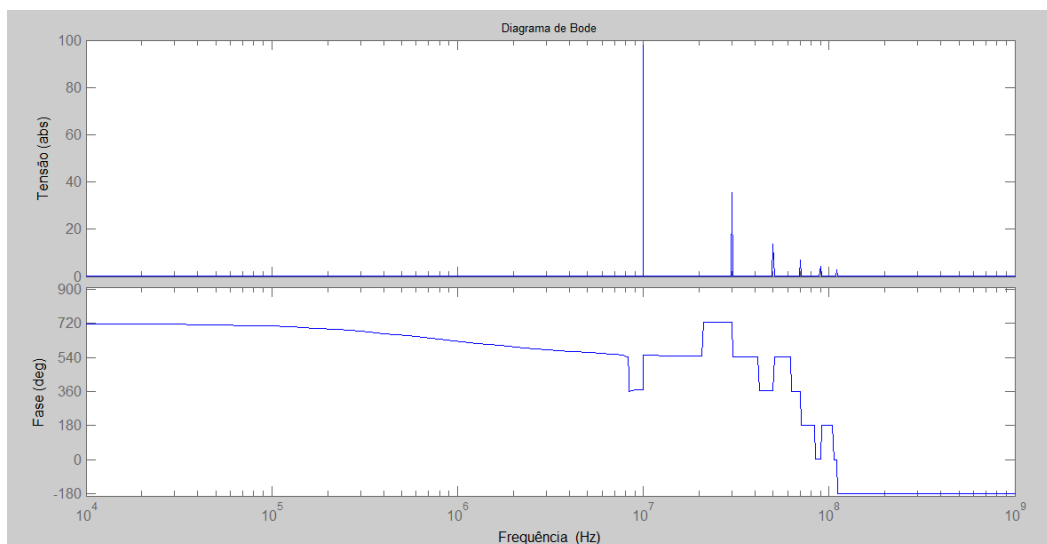


Figura 5.65 Resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente, em que há duzentas espiras e seis termos da série de Fourier.

Como foi observado para a resposta em frequência feita para a terceira configuração do circuito equivalente, aqui também para a quarta configuração, vê-se o surgimento de pico de frequência com o acréscimo de mais senóides a série de Fourier, como foi visto na seção 5.2, para 5 termos na série de Fourier o sinal assume um formato quadrado caracterizando uma onda quadrada na entrada do primário do transformador.

Geralmente em um sistema, ao se analisar sua resposta em frequência, quanto a fase, sabe-se que em altas frequências espera-se que o ângulo seja de 90 graus, em baixas frequências espera-se que seja 0 grau e na frequência de corte espera-se que seja 45 graus de inclinação. Contudo essa regra é válida para um pólo e vai aumentando com o aumento de pólos do sistema. Com o aumento dos graus dos pólos, a curva sofre um desvio de fase para baixo, o que vai depender do grau do pólo mais alto. Quando há um pico na magnitude, ou seja, na frequência de ressonância, espera-se encontrar uma mudança de fase de 180°. Essa mudança de fase não ocorre somente nas ressonâncias, mas também em valores intermediários de frequência que não têm nenhum comportamento especial aparente. Isto é, justamente devido ao fato de se usar uma escala linear para plotar a magnitude, a

qual esconde o comportamento de níveis de mais baixas frequências. Essa mudança de fase é devida a picos invertidos que são denominados de anti-ressonância, que, dependendo do número de polos, surgem logo após a frequência de ressonância do sistema e na escala linear não são percebidos na magnitude.

5.5 COMPARAÇÕES DOS ARTIGOS COM OS RESULTADOS OBTIDOS.

Usando os resultados encontrados em [11], tem-se a resposta em frequência experimental para o transformador de bobinas planas. Com isso, é possível se comparar com os resultados encontrados computacionalmente. Na Figura 5.66, tem-se a comparação entre experimental e computacional.

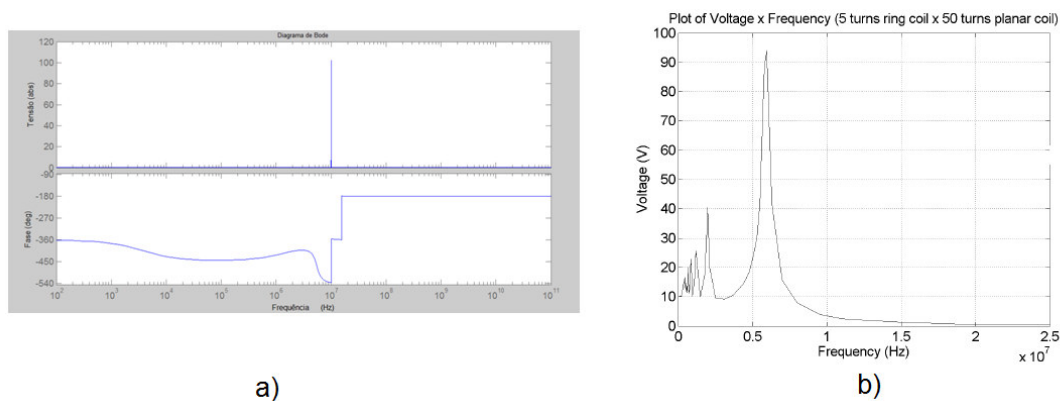


Figura 5.66 Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 7 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

Através da Figura 5.66 é possível se ver uma semelhança na resposta em frequência. Contudo, é bom enfatizar que os dados reais foram obtidos usando um gerador de funções com onda quadrada e para a resposta computacional foi usado uma soma de senóide com o intuito de se obter uma aproximação de uma onda quadrada pela série de Fourier. Todavia, essa resposta é coerente, pois o pico de ressonância ocorre na mesma frequência, e cada pico na resposta computacional representa um componente da série de Fourier.

A Figura 5.67 mostra a resposta em frequência para a entrada senoidal para a terceira configuração do circuito equivalente:

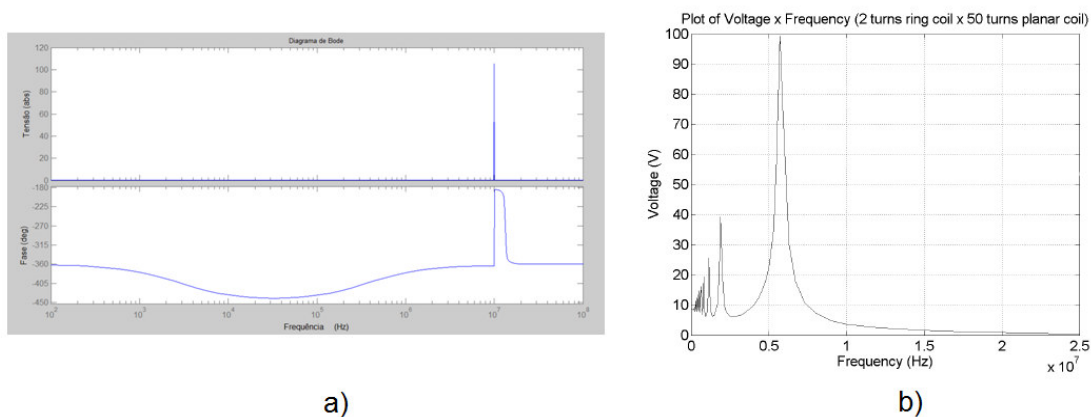


Figura 5.67 Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 2 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

A Figura 5.68 mostra a resposta em frequência para a entrada senoidal para a terceira configuração do circuito equivalente com diferentes números de espiras:

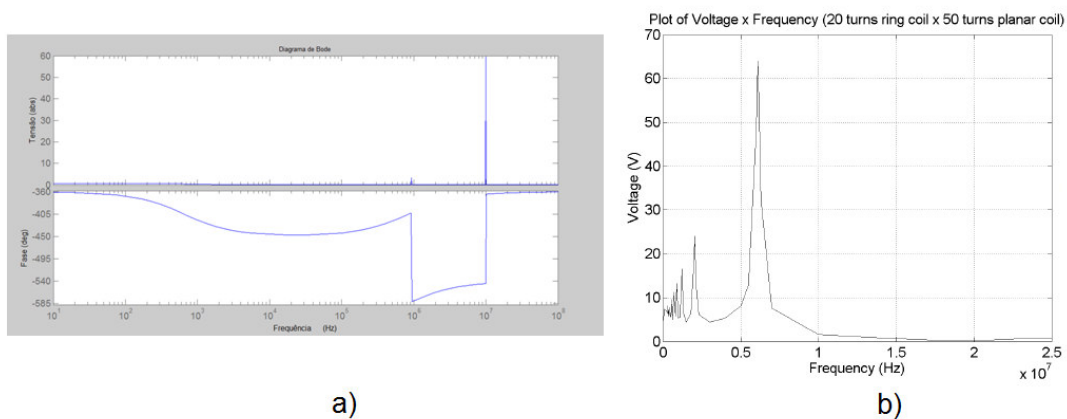


Figura 5.68 Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 20 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

A Figura 5.69 mostra a resposta em frequência para a entrada senoidal para a quarta configuração do circuito equivalente com diferentes números de espiras:

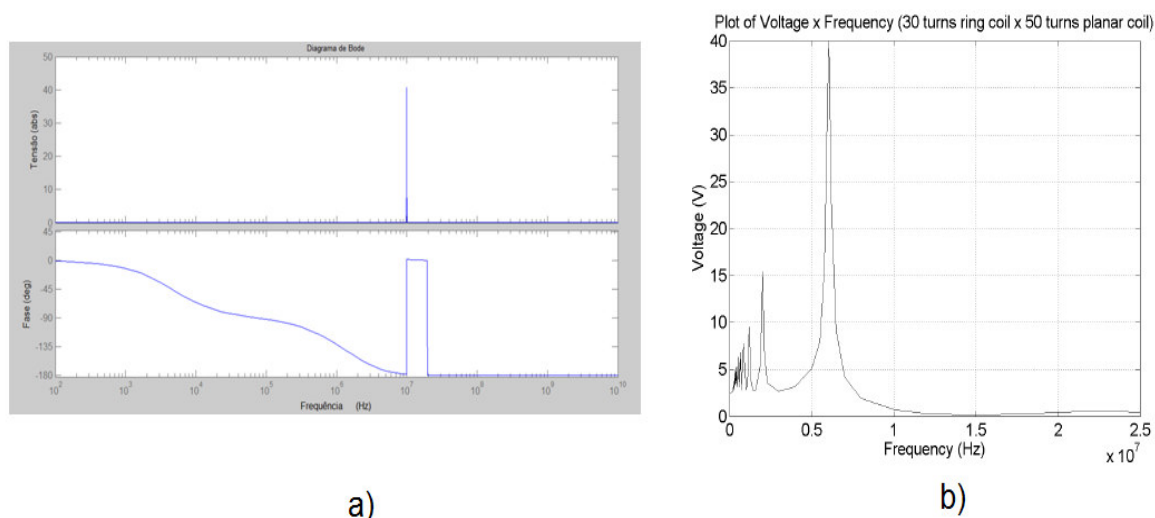


Figura 5.69 Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 30 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

A Figura 5.70 mostra a resposta em frequência para a quarta configuração do circuito equivalente quando apresenta uma onda senoidal na entrada:

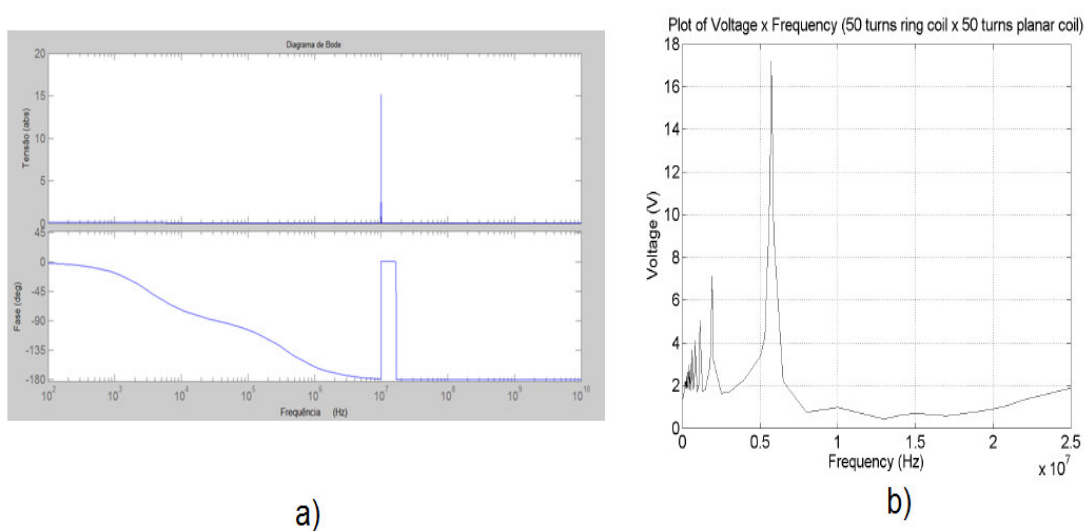


Figura 5.70 Comparação entre respostas em frequência, entre computacional (a) e real (b), para 50 espiras no primário em anel e 50 espiras no secundário em disco.

Ao se analisar as Figuras 5.66 a 5.70, pode-se ver que os resultados experimentais são uma aproximação dos computacionais, tanto para o terceiro circuito proposto quanto para o quarto circuito proposto. Essa resposta em frequência do sistema é aceitável para uma entrada quadrada ou senoidal, com foi provado nesse Capítulo que a onda quadrada é uma soma de senóides, e com o acréscimo de um termo na série de Fourier aparece um pico com menor intensidade, porém o pico de maior intensidade ocorre na frequência de ressonância do sistema.

CAPÍTULO 6

6.1 CONCLUSÕES

Ao propor modelos matemáticos para representar o transformador de bobinas planas, fez-se o tratamento matemático desses modelos com o objetivo de conhecer suas funções de transferência para posteriormente simulá-las computacionalmente usando o software MATLAB.

Posteriormente, realizou-se teste no laboratório para se conhecer a resposta real fornecida pelo transformador de bobinas planas para diferentes números de espiras no primário e secundário.

Com essas informações, foi possível comparar as respostas de cada modelo com a resposta experimental e concluiu-se que o terceiro e quarto modelo proposto são os mais apropriados para representar o transformador de bobinas planas em altas frequências.

Percebeu-se que quando há um pico na magnitude, ou seja, na frequência de ressonância, espera-se encontrar uma mudança de fase de 180° .

Essa mudança de fase não ocorre somente nas ressonâncias, mas também em valores intermediários de frequência que não tem nenhum comportamento especial aparente.

Essa mudança de fase é devido a picos invertidos que são denominados de anti-ressonância, que dependendo do número de polos surge logo após a frequência de ressonância do sistema e na escala linear não são percebidos na magnitude.

Se viu que, na frequência de ressonância, a relação de transformações dos transformadores não são obedecidas, contrariando a teoria clássica dos transformadores.

E nessa frequência percebe-se o alto ganho dos transformadores, devido a topologia em disco e em anel das bobinas do transformador.

A modelagem desse transformador em altas frequências foi possível através dos modelos propostos.

Tanto as respostas em frequências quanto as respostas em degrau computacionais foram coerentes com as encontradas experimentalmente, apresentando uma boa aproximação.

Para aplicações futuras, deseja-se aprimorar esse modelo matemático proposto, analisando a influência que a frequência de ressonância proporciona em cada resposta e com isso atingir o objetivo desse projeto, transmitir energia sem fio.

REFERÊNCIAS

- [1] ALEXANDER, Charles K; SADIKU, Matthew N. “*Fundamentos de Circuitos Elétricos*”. 3ª Edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2003.
- [2] FITZGERALD, A. E. Máquinas Elétricas. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [3] NUSSENZVEIG, H. MOYSÉS. Curso de Física Básica: eletromagnetismo. Vol. 3.1.ed. São Paulo: Editora Blücher, 1997.
- [4] M. J. Hole and L. C. Appel, “Stray Capacitance of a two-layer air-cored Inductor”, *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, Vol. 152, No. 6, pp. 565-572, December 2005.
- [5] G. Grandi, et al., “Stray Capacitances of Single-Layer Solenoid Air-Core Inductors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, pp. 1162-1168, September/October 1999.
- [6] ARAUJO, G. de A., VASCONCÉLOS JUNIOR, C. A. V., Costa, E. M. M., “Desenvolvimento de um Transformador Experimental para Estudos em Eletromagnetismo”, *Diálogos & Ciência*, 163-176, 2010.
- [7] DENICOLAI, M., “Tesla transformer for experimentation and research.” Licentiate Thesis, Helsinki University of Technology, May 2001.
- [8] NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- [9] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- [10] LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- [11] Costa, E. M. M., A basic analysis about induced EMF of planar coils to ring coils,” *Progress In Electromagnetic Research*, Vol. 17, 85-100, 2009.

- [12] Grandi, G., et al., Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 5, 1162,1168, September/October 1999.
- [13] Boyce, Willian E.;Diprima Richard C. Equações Difer ebciais Elementares - Problemas de Valores de Contorno. Terceira Edição. Editora Guanabara Koogan S.A.Rio de Janeiro, RJ, 1990.
- [14] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility. New York: Wiley, 1992, pp. 3–5, 17–19.
- [15] H. W. Ott, Noise reduction techniques in electronic systems, BellTelephone Labs., Inc., pp. 25–31, pp. 151–152, 1976.
- [16] A. Yagasaki, Electromagnetic noise reduction and isolation techniques, in Proc. Inst. Electrostat., Japan, vol. 18, pp. 274–275 (in Japanese).
- [17] L. Peters and W. G. Swarner, Approximations for dielectric or plasma scatters, Proc. IEEE, vol. 53, pp. 882–892, Aug. 1965.
- [18] H. M. Nussenzveig, "High-frequency scattering by a transparent sphere—Part I: Direct reflection and transmission; Part II: Theory of the rainbow and the glory," *J. Math. Phys.*, vol. 10, pp. 82–177, Jan. 1969.
- [19] W. Franz, "Über die Greenschen funktionen des zylinders und der kugel," *Z. Naturforsch.*, vol. A-9, pp. 705–716, 1954.
- [20] G. V. Frisk, J. W. Dickey, and H. U" berall, "Surface wave modes on elastic cylinders," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 58, pp. 996–1008, Nov. 1975.
- [21] P. Barber, J. F. Owen, and R. K. Chang, "Resonant scattering for characterization of axisymmetric dielectric objects," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-30, pp. 168–172, Mar. 1982.
- [22] V. H. Rumsey, "Horn antennas wih uniform power patterns around their axes," *IEEE Trans.*, vol. AP-14, pp. 656–658, Sept. 1966.

- [23] K. S. Rao, A simple dual-band corrugated horn with low cross polarization, *IEEE Trans.*, vol. AP-38, pp. 946–951, June 1990.
- [24] G. Reed, J. Paserba, T. Croasdaile, M. Takeda, N. Morishima, Y. Hamasaki, L. Thomas, and W. Allard, “STATCOM application at VELCO Essex substation,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. T&D Conf. Expo., Atlanta, GA, Oct./Nov. 2001.
- [25] G. Reed, J. Paserba, T. Croasdaile, R. Westover, S. Jochi, N. Morishima, M. Takeda, T. Sugiyama, Y. Hamazaki, T. Snow, and A. Abed, “SDG&E Talega STATCOM project—system analysis, design, and configuration,” in Proc. IEEE Power Eng. Soc. T&D—Asia Conf. Expo., Yokohama, Japan, Oct. 2002.
- [26] L. Paulsson, B. Ekehov, S. Halen, T. Larsson, L. Palmqvist, A. A. Edris, D. Kidd, A. J. F. Keri, and B. Mehraban, “High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, pp. 1410–1415, Oct. 2003.
- [27] J. Choma, Jr and S. Witherspoon, “Computationally efficient estimation of frequency response and driving point impedances in wide-band analog amplifiers,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no. 6, pp. 720–728, Jun. 1990.
- [28] L. Wang, F. Howell, P. Kundur, C. Y. Chung, and W. Xu, “A tool for small-signal security assessment of power systems,” in Proc. PICA, Sydney, Australia, 2001.
- [29] IEEJ, *Denki Kogaku Handobukku (Handbook of Electrical Engineering)*, 1988, p. 713.
- [30] A.K.S. Bhat et al, *IEEE PESC '89 Record*, p. 768, 1989.
- [31] Y. Kataoka, K. Matsushita, and M. Ono, “High speed switchgear protecting power generating facilities against voltage dip and interruption,” in Proc. IEEE Power Electron. Drive Syst. Conf., 1995, vol. 2, pp. 726–731.
- [32] Y. P. Yeung, K. W. E. Cheng, D. Sutanto, and S. L. Ho, “Zero-current switching switched-capacitor quasi-resonant step-down converter,” in *Inst. Electr. Eng.—Proc. Electr. Power Appl.*, Mar. 2002, vol. 149, no. 2, pp. 111–121.
- [33] K. W. E. Cheng, “Computation of the ac resistance of multistranded conductor inductors with multilayers for high-frequency switching converters,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 831–834, Jul. 2000.

- [34] K. W. E. Cheng, "Modeling of solenoidal transformer for the calculation of leakage inductance using eddy current reaction field," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 5, pp. 1996–1999, May 2005.
- [35] C. Fitzer, M. Barnes, and P. Green, "Voltage sag detection techniques for a dynamic voltage restorer," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan. 2004.
- [36] A. Makdissi, E. de Clerq, C. Audoin, and A. Clairon, "Generalization of the Dick effect to continuous beam frequency standards," in *Proc. IEEE 1997 Int. Freq. Contr. Symp.*, Orlando, FL, pp. 263–269.
- [37] R. Barillet, F. Hamouda, D. Venot, and C. Audoin, "Limitation of the frequency stability by local oscillator phase noise: new investigations," in *13th Eur. Freq. Time Forum and 1999 IEEE Int. Freq. Contr. Symp.*, Besançon, France, pp. 3–6.
- [38] C. Szekely, F. Walls, J. Lowe, R. Drullinger, and A. Novick, "Reducing local oscillator phase noise limitations on the frequency stability of passive frequency standards: tests of a new concept," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 41, no. 4, pp. 518–521, Jul. 1994.
- [39] N. Bertram, *Theory of Magnetic Recording*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1994.
- [40] D. W. Baarman and T. L. Lautzenheiser, "Inductive coil assembly," U.S. Patent 6 975 198 Dec. 13, 2005, Access Business Group International LLC.
- [41] L. Cheng, J. W. Hay, and P. G. Beart, "Portable contact-less power transfer devices and rechargeable batteries," U.S. Patent 7 248 017 Jul. 2007.
- [42] A. Sabo, "Alignment independent and self aligning inductive power transfer system," U.S. Patent 6 803 744 Oct. 2004.
- [43] S. Y. R. Hui, "Inductive battery charger system with primary transformer windings formed in multilayer structure," U.S. Patent 7 164 255 Jan. 2007.
- [44] X. Liu and S. Y. R. Hui, "Equivalent circuit modeling of a multilayer planar winding array structure for use in a universal contactless battery charging platform," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 1, pp. 21–29, Jan. 2007.

- [45] Costa, E. M. M., Responses in transformers built with planar coils inner ring coils excited by square waves," *Progress In Electromagnetic Research*, Vol. 18, 43-58, 2009.
- [46] Costa, E. M. M., Resonance between planar coils vs ring coils excited by square waves," *Progress In Electromagnetic Research*, Vol. 18, 59-81, 2009.
- [47] Costa, E. M. M., Resonance on transformers excited by square waves and explanation of the high voltage on tesla transformer," *Machine Copy For Proofreading*, Vol. x, y-z, 2009.
- [48] Costa, E. M. M., Parasitic capacitances on planar coil," *Machine Copy For Proofreading*, Vol. x, y-z, 2009.
- [49] Costa, E. M. M., Resonance on coils excited by square waves: explaining Tesla transformer," *IEEE transactions on magnetics*, Vol. 46, No. 5, May 2010.

APÊNDICE- CÓDIGOS NO MATLAB

Código para a primeira proposta do circuito equivalente do transformador de bobinas planas.

Onda quadrada como entrada e diagrama de bode.

```

%%simulação para a 1º configuração.
%% Para esse circuito se tem a seguinte expressão pra FT:
%%  $V_0/V_i = (sL_3+R_2)/(s(L_3+L_2)+R_2)$ 
%% Parâmetros para n=2(número de coils)
%% Sendo  $L_3+L_2= 2.1972*10^{-5}$ 
%%R2=0.8;
%%L3=1.72*10-7;
%%L2=2.18*10-5;

num=[0 1.72*10-7 0.8];
den=[0 2.1972*10-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den)
step(Cir1_B02)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)
%% Sendo  $L_3+L_2= 7.6572*10^{-5}$ 
%%R2=1.81;
%%L3=1.72*10-7;
%%L2=7.64*10-5;

num1=[0 1.72*10-7 1.81];
den1=[0 7.6572*10-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1)
step(Cir1_B07)

%% Parâmetros para n=15(número de coils)
%% Sendo  $L_3+L_2= 1.63812*10^{-4}$ 

%%R2=3.49;
%%L3=1.72*10-7;
%%L2=1.6364*10-4;

num2=[0 1.72*10-7 3.49];
den2=[0 1.63812*10-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2)
step(Cir1_B15)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)
%% Sendo  $L_3+L_2= 2.18369*10^{-4}$ 

%%R2=1.73;
%%L3=1.69*10-7;
%%L2=2.182*10-4;

num3=[0 1.69*10-7 1.73];
den3=[0 2.18369*10-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3)
step(Cir1_B20)

```

```

%% Parâmetros para n=30(número de coils)
%% Sendo L3+L2= 2.37472*10^-4

%R2=6.78;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=2.373*10^-4;

num4=[0 1.72*10^-7 6.78];
den4=[0 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)
step(Cir1_B30)

%% Parâmetros para n=50(número de coils)
%% Sendo L3+L2= 5.45672*10^-4

%R2=11.1;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=5.455*10^-4;

num5=[0 1.72*10^-7 11.1];
den5=[0 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)
step(Cir1_B50)

%%Para uma comparação entre esses valores temos:
hold on
step(Cir1_B02)
step(Cir1_B07)
step(Cir1_B15)
step(Cir1_B20)
step(Cir1_B30)
step(Cir1_B50)

%%Diagrama de bode

hold on
bode(Cir1_B02)
bode(Cir1_B07)
bode(Cir1_B15)
bode(Cir1_B20)
bode(Cir1_B30)
bode(Cir1_B50)

```

Código para a segunda proposta do circuito equivalente do transformador de bobinas planas.

Onda quadrada como entrada e diagrama de bode.

```

%%simulação para a 2° configuração.
%% Para esse circuito se tem a seguinte expressão pra FT:
%%  $G(s)=V2/V1 = (R2+sL3)/(s^3*L2*L3*C2+s^2*R2*C2*L2+s(L2+L3)+R2)$ 
%% Parâmetros para n=2(número de coils)
%%R2=0.8;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=2.18*10^-5;

```

```

%%C2=8.24*10^-10;
%% Sendo L3+L2= 2.1972*10^-5
%% Sendo R2*C2*L2= 1.437056*10^-14
%% Sendo L3*L2*C2= 3.0896704*10^-21

num=[0 0 1.72*10^-7 0.8];
den=[3.0896704*10^-21 1.437056*10^-14 2.1972*10^-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den)
step(Cir1_B02)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)
%R2=1.81;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=7.64*10^-5;
%%C2=4.94*10^-9;
%% Sendo L3+L2= 7.6572*10^-5
%% Sendo R2*C2*L2= 6.8312296*10^-13
%% Sendo L3*L2*C2= 6.4915552*10^-20

num1=[0 0 1.72*10^-7 1.81];
den1=[6.49155*10^-20 6.8312296*10^-13 7.6572*10^-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1)
step(Cir1_B07)

%% Parâmetros para n=15(número de coils)

%R2=3.49;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=1.6364*10^-4;
%C2=1.15*10^-8;
%% Sendo L3+L2= 1.63812*10^-4
%% Sendo R2*C2*L2= 6.5676914*10^-12
%% Sendo L3*L2*C2= 3.2367992*10^-19

num2=[0 0 1.72*10^-7 3.49];
den2=[3.2367992*10^-19 6.5676914*10^-12 1.63812*10^-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2)
step(Cir1_B15)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)

%R2=1.73;
%L3=1.69*10^-7;
%L2=2.182*10^-4;
%C2=1.75*10^-8;
%% Sendo L3+L2= 2.18369*10^-4
%% Sendo R2*C2*L2= 6.606*10^-12
%% Sendo L3*L2*C2= 6.453265*10^-19

num3=[0 0 1.69*10^-7 1.73];
den3=[6.453265*10^-19 6.606*10^-12 2.18369*10^-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3)
step(Cir1_B20)

%% Parâmetros para n=30(número de coils)

%R2=6.78;
%L3=1.72*10^-7;

```

```

%L2=2.373*10^-4;
%C2=2.39*10^-8;
%% Sendo L3+L2= 2.37472*10^-4
%% Sendo R2*C2*L2= 3.845*10^-11
%% Sendo L3*L2*C2= 9.755*10^-19

num4=[0 0 1.72*10^-7 6.78];
den4=[9.755*10^-19 3.845*10^-11 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)
step(Cir1_B30)

%% Parâmetros para n=50(número de coils)

%R2=11.1;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=5.455*10^-4;
%C2=4.04*10^-8;
%% Sendo L3+L2= 5.45672*10^-4
%% Sendo R2*C2*L2= 2.446*10^-10
%% Sendo L3*L2*C2= 3.7905*10^-18

num5=[0 0 1.72*10^-7 11.1];
den5=[3.7905*10^-18 2.446*10^-10 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)
step(Cir1_B50)

%% Parâmetros para n=200(número de coils)

%R2=77.4;
%L3=1.65*10^-7;
%L2=3.2835*10^-5;
%C2=9.21*10^-10;
%% Sendo L3+L2= 3.3*10^-5
%% Sendo R2*C2*L2= 2.3406*10^-12
%% Sendo L3*L2*C2= 4.989*10^-21

num6=[0 0 1.65*10^-7 77.4];
den6=[4.989*10^-21 2.3406*10^-12 3.3*10^-5 77.4];
Cir1_B200=tf(num6,den6)
step(Cir1_B200)

%%Para uma comparação entre esses valores temos:
hold on
step(Cir1_B02)
step(Cir1_B07)
step(Cir1_B15)
step(Cir1_B20)
step(Cir1_B30)
step(Cir1_B50)
step(Cir1_B200)
%%Diagrama de bode

hold on
bode(Cir1_B02)
bode(Cir1_B07)
bode(Cir1_B15)
bode(Cir1_B20)
bode(Cir1_B30)
bode(Cir1_B50)
bode(Cir1_B200)

```

Código para a terceira proposta do circuito equivalente do transformador de bobinas planas.

Onda quadrada como entrada e diagrama de bode.

```

%%simulação para a 3° configuração.
%% Para esse circuito se tem a seguinte expressão pra FT:
%%  $G(s)=V2/V1$ 

$$=(R2+sL3+s^2L3C4R2)/(s^4*L3*C4*C2*R2*L2+s^3*L2*(L3*C2+L3*C4)+s^2*(L3*C4*R2+R2*C2*L2)+s(L2+L3)+R2)$$

%% Parâmetros para n=2(número de coils)

%%R2=0.8;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=2.18*10^-5;
%%C2=8.24*10^-10;
%%C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2= 1.1118*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3+L2= 2.1972*10^{-5}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2= 1.437*10^{-14}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4)=3.119967*10^{-21}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2= 1.99716*10^{-32}$ 

num=[0 0 1.1118*10^-18 1.72*10^-7 0.8];
den=[1.99716*10^-32 3.119967*10^-21 1.437*10^-14 2.1972*10^-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den)
step(Cir1_B02)
bode(Cir1_B02)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)
%%R2=1.81;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=7.64*10^-5;
%%C2=4.94*10^-9;
%%C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2= 2.5155*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3+L2= 7.6572*10^{-5}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2= 6.8312*10^{-13}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4)= 6.50217*10^{-20}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2= 9.49377*10^{-31}$ 

num1=[0 0 2.5155*10^-18 1.72*10^-7 1.81];
den1=[9.49377*10^-31 6.50217*10^-20 6.8312*10^-13 7.6572*10^-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1)
step(Cir1_B07)
bode(Cir1_B07)
%% Parâmetros para n=15(número de coils)

%%R2=3.49;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=1.6364*10^-4;
%%C2=1.15*10^-8;

```

```

%%C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2 = 4.8502*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3+L2 = 1.63812*10^{-4}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2 = 6.56769*10^{-12}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4) = 3.23907*10^{-19}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2 = 9.1275*10^{-30}$ 

num2=[0 0 4.8502*10^-18 1.72*10^-7 3.49];
den2=[9.1275*10^-30 3.23907*10^-19 6.56769*10^-12 1.63812*10^-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2)
step(Cir1_B15)
bode(Cir1_B15)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)

R2=1.73;
L3=1.69*10^-7;
L2=2.182*10^-4;
C2=1.75*10^-8;
C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2 = 2.3623*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3+L2 = 2.18369*10^{-4}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2 = 6.606*10^{-12}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4) = 6.4651*10^{-19}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2 = 9.0206*10^{-30}$ 

num3=[0 0 2.3623*10^-18 1.69*10^-7 1.73];
den3=[9.0206*10^-30 6.4651*10^-19 6.606*10^-12 2.18369*10^-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3)
step(Cir1_B20)
bode(Cir1_B20)

%% Parâmetros para n=30(número de coils)

R2=6.78;
L3=1.72*10^-7;
L2=2.373*10^-4;
C2=2.39*10^-8;
C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2 = 9.4226*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3+L2 = 2.37472*10^{-4}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2 = 3.8452*10^{-11}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4) = 9.758*10^{-19}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2 = 5.34398*10^{-29}$ 

num4=[0 0 9.4226*10^-18 1.72*10^-7 6.78];
den4=[5.34398*10^-29 9.758*10^-19 3.8452*10^-11 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)
step(Cir1_B30)

```

```

bode(Cir1_B30)

%% Parâmetros para n=50(número de coils)

%R2=11.1;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=5.455*10^-4;
%C2=4.04*10^-8;
%%C4=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L3*C4*R2 = 1.5426*10^{-17}$ 
%% Sendo  $L3+L2 = 5.45672*10^{-4}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2 = 2.4462*10^{-10}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4) = 3.7913*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2 = 3.39968*10^{-28}$ 

num5=[0 0 1.5426*10^-17 1.72*10^-7 11.1];
den5=[3.39968*10^-28 3.7913*10^-18 2.4462*10^-10 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)
step(Cir1_B50)
bode(Cir1_B50)

%% Parâmetros para n=200(número de coils)

%R2=77.4;
%L3=1.65*10^-7;
%L2=3.2835*10^-5;
%C2=9.21*10^-10;
%%C4=2.195*10^-9;

%% Sendo  $L3*C4*R2 = 2.8032*10^{-14}$ 
%% Sendo  $L3+L2 = 3.3*10^{-5}$ 

%% Sendo  $L3*C4*R2+L2*R2*C2 = 2.3687*10^{-12}$ 
%% Sendo  $L2*(L3*C2+L3*C4) = 1.688*10^{-20}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2*C4*R2 = 8.47727*10^{-28}$ 

%% Sendo  $R2*C2*L2 = 2.3406*10^{-12}$ 
%% Sendo  $L3*L2*C2 = 4.989*10^{-21}$ 

num6=[0 0 2.8032*10^-14 1.65*10^-7 77.4];
den6=[8.47727*10^-28 1.688*10^-20 2.3687*10^-12 3.3*10^-5 77.4];
Cir1_B200=tf(num6,den6)
step(Cir1_B200)
bode(Cir1_B200)

%%Para uma comparação entre esses valores temos:
hold on
step(Cir1_B02)
step(Cir1_B07)
step(Cir1_B15)
step(Cir1_B20)
step(Cir1_B30)
step(Cir1_B50)
step(Cir1_B200)

%%Diagrama de bode

```



```

hold on
bode(Cir1_B02)
bode(Cir1_B07)
bode(Cir1_B15)
bode(Cir1_B20)
bode(Cir1_B30)
bode(Cir1_B50)
bode(Cir1_B200)

```

Código para a quarta proposta do circuito equivalente do transformador de bobinas planas.

Onda quadrada como entrada e diagrama de bode.

```

%%simulação para a 4º configuração.
%% Para esse circuito se tem a seguinte expressão pra FT:
%%  $G(s)=V2/V1$ 

$$= (R2+sL3+s^2(L2C5R2+L3C4R2)+s^3L3L2C5+s^4L3C4R2L2C5) / (s^4(L2C5L3C4R2+L2L3C4C2R2)+s^3(L2C5L3+L2L3C2+L2L3C4)+s^2(L2C5R2+L3C4R2+L2R2C2)+s(L2+L3)+R2)$$

%% Parâmetros para n=2(número de coils)
%%R2=0.8;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=2.18*10^-5;
%%C2=8.24*10^-10;
%%C4=8.08*10^-12;
%%C5=8.08*10^-12;

%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2= 1.4203*10^{-16}$ 
%% Sendo  $L3L2C5= 3.02968*10^{-23}$ 
%% Sendo  $L3C4R2L2C5= 1.9584*10^{-34}$ 

%% Sendo  $L3+L2= 2.1972*10^{-5}$ 
%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2+L2R2C2= 1.451259*10^{-14}$ 
%% Sendo  $L2C5L3+L2L3C2+L2L3C4= 3.15026*10^{-21}$ 
%% Sendo  $L2C5L3C4R2+L2L3C4C2R2= 2.01675*10^{-32}$ 

num=[1.9584*10^-34 3.02968*10^-23 1.4203*10^-16 1.72*10^-7 0.8];
den=[2.01675*10^-32 3.15026*10^-21 1.451259*10^-14 2.1972*10^-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den)
step(Cir1_B02)
bode(Cir1_B02)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)
%%R2=1.81;
%%L3=1.72*10^-7;
%%L2=7.64*10^-5;
%%C2=4.94*10^-9;
%%C4=8.08*10^-12;
%%C5=1.35*10^-12;

%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2= 1.89199*10^{-16}$ 
%% Sendo  $L3L2C5= 1.774*10^{-23}$ 
%% Sendo  $L3C4R2L2C5= 2.59445*10^{-34}$ 

```

```

%% Sendo  $L_3+L_2= 7.6572 \cdot 10^{-5}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot R_2 + L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot R_2 \cdot C_2 = 6.83312 \cdot 10^{-13}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 = 6.50395 \cdot 10^{-20}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot C_2 \cdot R_2 = 9.49636 \cdot 10^{-31}$ 

num1=[2.59445*10^-34 1.774*10^-23 1.89199*10^-16 1.72*10^-7 1.81];
den1=[9.49636*10^-31 6.50395*10^-20 6.83312*10^-13 7.6572*10^-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1)
step(Cir1_B07)
bode(Cir1_B07)
%% Parâmetros para n=15(número de coils)

R2=3.49;
L3=1.72*10^-7;
L2=1.6364*10^-4;
C2=1.15*10^-8;
C4=8.08*10^-12;
C5=5.77*10^-13;

%% Sendo  $L_2 C_5 R_2 + L_3 C_4 R_2 = 3.34377 \cdot 10^{-16}$ 
%% Sendo  $L_3 L_2 C_5 = 1.624 \cdot 10^{-23}$ 
%% Sendo  $L_3 C_4 R_2 L_2 C_5 = 4.5796 \cdot 10^{-34}$ 

%% Sendo  $L_3+L_2= 1.63812 \cdot 10^{-4}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot R_2 + L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot R_2 \cdot C_2 = 6.568 \cdot 10^{-12}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 = 3.23923 \cdot 10^{-19}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot C_2 \cdot R_2 = 9.12797 \cdot 10^{-30}$ 

num2=[4.5796*10^-34 1.624*10^-23 3.34377*10^-16 1.72*10^-7 3.49];
den2=[9.12797*10^-30 3.23923*10^-19 6.568*10^-12 1.63812*10^-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2)
step(Cir1_B15)
bode(Cir1_B15)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)

R2=1.73;
L3=1.69*10^-7;
L2=2.182*10^-4;
C2=1.75*10^-8;
C4=8.08*10^-12;
C5=4.25*10^-13;

%% Sendo  $L_2 C_5 R_2 + L_3 C_4 R_2 = 1.6301 \cdot 10^{-16}$ 
%% Sendo  $L_3 L_2 C_5 = 1.5672 \cdot 10^{-23}$ 
%% Sendo  $L_3 C_4 R_2 L_2 C_5 = 2.1907 \cdot 10^{-34}$ 

%% Sendo  $L_3+L_2= 2.18369 \cdot 10^{-4}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot R_2 + L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot R_2 \cdot C_2 = 6.606 \cdot 10^{-12}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 = 6.465 \cdot 10^{-19}$ 
%% Sendo  $L_2 \cdot C_5 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot R_2 + L_2 \cdot L_3 \cdot C_4 \cdot C_2 \cdot R_2 = 9.033 \cdot 10^{-30}$ 

num3=[2.1907*10^-34 1.5672*10^-23 1.6301*10^-16 1.69*10^-7 1.73];
den3=[9.033*10^-30 6.465*10^-19 6.606*10^-12 2.18369*10^-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3)
step(Cir1_B20)
bode(Cir1_B20)

```

```

%% Parâmetros para n=30(número de coils)

%R2=6.78;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=2.373*10^-4;
%C2=2.39*10^-8;
%%C4=8.08*10^-12;
%%C5=2.79*10^-13;

%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2= 4.583*10^{-16}$ 
%% Sendo  $L3L2C5= 1.138755*10^{-23}$ 
%% Sendo  $L3C4R2L2C5= 6.23837*10^{-34}$ 

%% Sendo  $L3+L2= 2.37472*10^{-4}$ 
%% Sendo  $L2*C5*R2+L3*C4*R2+L2*R2*C2= 3.8453*10^{-11}$ 
%% Sendo  $L2*C5*L3+L2*L3*C2+L2*L3*C4= 9.75834*10^{-19}$ 
%% Sendo  $L2*C5*L3*C4*R2+L2*L3*C4*C2*R2= 5.344*10^{-29}$ 

num4=[6.23837*10^-34 1.138755*10^-23 4.583*10^-16 1.72*10^-7 6.78];
den4=[5.344*10^-29 9.75834*10^-19 3.8453*10^-11 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)
step(Cir1_B30)
bode(Cir1_B30)

%% Parâmetros para n=50(número de coils)

%R2=11.1;
%L3=1.72*10^-7;
%L2=5.455*10^-4;
%C2=4.04*10^-8;
%%C4=8.08*10^-12;
%%C5=1.65*10^-13;

%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2= 1.0145*10^{-15}$ 
%% Sendo  $L3L2C5= 1.548129*10^{-23}$ 
%% Sendo  $L3C4R2L2C5= 1.3885*10^{-33}$ 

%% Sendo  $L3+L2= 5.45672*10^{-4}$ 
%% Sendo  $L2*C5*R2+L3*C4*R2+L2*R2*C2= 2.44625*10^{-10}$ 
%% Sendo  $L2*C5*L3+L2*L3*C2+L2*L3*C4= 3.7913*10^{-18}$ 
%% Sendo  $L2*C5*L3*C4*R2+L2*L3*C4*C2*R2= 3.39968*10^{-28}$ 

num5=[1.3885*10^-33 1.548129*10^-23 1.0145*10^-15 1.72*10^-7 11.1];
den5=[3.39968*10^-28 3.7913*10^-18 2.44625*10^-10 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)
step(Cir1_B50)
bode(Cir1_B50)

%% Parâmetros para n=200(número de coils)

%R2=77.4;
%L3=1.65*10^-7;
%L2=3.2835*10^-5;
%C2=9.21*10^-10;
%%C4=2.195*10^-9;
%%C5=1.103*10^-11;

```

```

%% Sendo  $L2C5R2+L3C4R2= 5.6064 \cdot 10^{-14}$ 
%% Sendo  $L3L2C5= 5.9758 \cdot 10^{-23}$ 
%% Sendo  $L3C4R2L2C5= 1.015247 \cdot 10^{-29}$ 

%% Sendo  $L3+L2= 3.3 \cdot 10^{-5}$ 
%% Sendo  $L2 \cdot C5 \cdot R2 + L3 \cdot C4 \cdot R2 + L2 \cdot R2 \cdot C2= 2.3967 \cdot 10^{-12}$ 
%% Sendo  $L2 \cdot C5 \cdot L3 + L2 \cdot L3 \cdot C2 + L2 \cdot L3 \cdot C4= 1.694 \cdot 10^{-20}$ 
%% Sendo  $L2 \cdot C5 \cdot L3 \cdot C4 \cdot R2 + L2 \cdot L3 \cdot C4 \cdot C2 \cdot R2= 8.578796 \cdot 10^{-28}$ 

num6=[1.015247*10^-29 5.9758*10^-23 5.6064*10^-14 1.65*10^-7 77.4];
den6=[8.578796*10^-28 1.694*10^-20 2.3967*10^-12 3.3*10^-5 77.4];
Cir1_B200=tf(num6,den6)
step(Cir1_B200)
bode(Cir1_B200)

%%Para uma comparação entre esses valores temos:
hold on
step(Cir1_B02)
step(Cir1_B07)
step(Cir1_B15)
step(Cir1_B20)
step(Cir1_B30)
step(Cir1_B50)
step(Cir1_B200)

%%Diagrama de bode

hold on
bode(Cir1_B02)
bode(Cir1_B07)
bode(Cir1_B15)
bode(Cir1_B20)
bode(Cir1_B30)
bode(Cir1_B50)
bode(Cir1_B200)

%% Terceira configuração:
%% Parâmetros para n=2(número de coils)
num=[0 0 1.1118*10^-18 1.72*10^-7 0.8];
den=[1.99716*10^-32 3.119967*10^-21 1.437*10^-14 2.1972*10^-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den);
d=(4/pi);
g=(4/(3*pi));
s=(4/(5*pi));
l=(4/(7*pi));
o=(4/(9*pi));
q=(4/(11*pi));

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B02;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B02;
%%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B02;
%%bode(TT3);

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B02;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B02;
%%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;

```

```

TT6=TT6s*Cir1_B02;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)

num1=[0 0 2.5155*10^-18 1.72*10^-7 1.81];
den1=[9.49377*10^-31 6.50217*10^-20 6.8312*10^-13 7.6572*10^-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1);

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B07;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B07;
%%bode(TT2)

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B07;
%%bode(TT3)

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B07;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;

```

```

w1=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B07;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B07;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=15(número de coils)
num2=[0 0 4.8502*10^-18 1.72*10^-7 3.49];
den2=[9.1275*10^-30 3.23907*10^-19 6.56769*10^-12 1.63812*10^-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2);

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B15;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B15;
%%bode(TT2)

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];

```

```

T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B15;
%%bode(TT3)

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B15;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B15;
%%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B15;
%%bode(TT6)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)

num3=[0 0 2.3623*10^-18 1.69*10^-7 1.73];
den3=[9.0206*10^-30 6.4651*10^-19 6.606*10^-12 2.18369*10^-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3);

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B20;

```



```

%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B20;
%%bode(TT2)

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B20;
%%bode(TT3)

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B20;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B20;
%%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];

```

```

dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B20;
bode(TT6)

```

```

%% Parâmetros para n=30(número de coils)

```

```

num4=[0 0 9.4226*10^-18 1.72*10^-7 6.78];
den4=[5.34398*10^-29 9.758*10^-19 3.8452*10^-11 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)

```

```

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B30;
%%bode(TT1);

```

```

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B30;
%%bode(TT2)

```

```

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B30;
%%bode(TT3)

```

```

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;

```

```

TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B30;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B30;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B30;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=50(número de coils)

num5=[0 0 1.5426*10^-17 1.72*10^-7 11.1];
den5=[3.39968*10^-28 3.7913*10^-18 2.4462*10^-10 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B50;
%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B50;
%%bode(TT2)

%% Três termos:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B50;
%%bode(TT3)

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B50;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B50;
%%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B50;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=200(número de coils)

num6=[0 0 2.8032*10^-14 1.65*10^-7 77.4];
den6=[8.47727*10^-28 1.688*10^-20 2.3687*10^-12 3.3*10^-5 77.4];
Cir1_B200=tf(num6,den6)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;

```

```

w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B200;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B200;
%%bode(TT2)

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B200;
%%bode(TT3)

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B200;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B200;
%bode(TT5);

```

```

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B200;
bode(TT6)

%%simulação para a 4° configuração.
%% Parâmetros para n=2(número de coils)

num=[1.9584*10^-34 3.02968*10^-23 1.4203*10^-16 1.72*10^-7 0.8];
den=[2.01675*10^-32 3.15026*10^-21 1.451259*10^-14 2.1972*10^-5 0.8];
Cir1_B02=tf(num,den)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B02;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B02;
%%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B02;
%%bode(TT3);
%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;

```

```

numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=Tld+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B02;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w1l=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=Tld+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B02;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w1l=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=Tld+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B02;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=7(número de coils)

num1=[2.59445*10^-34 1.774*10^-23 1.89199*10^-16 1.72*10^-7 1.81];
den1=[9.49636*10^-31 6.50395*10^-20 6.83312*10^-13 7.6572*10^-5 1.81];
Cir1_B07=tf(num1,den1);

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w1l=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w1l];
T1=tf(numt1,dent1);
Tld=d*T1;
TT1=Tld*Cir1_B07;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w1l=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;

```

```

TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B07;
%%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2;
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B07;
%bode(TT3);

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2;
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B07;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2;
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B07;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2;
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B07;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=15(número de coils)

num2=[4.5796*10^-34 1.624*10^-23 3.34377*10^-16 1.72*10^-7 3.49];

```



```
den2=[9.12797*10^-30 3.23923*10^-19 6.568*10^-12 1.63812*10^-4 3.49];
Cir1_B15=tf(num2,den2)
```

```
%% Apenas um termo:
```

```
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B15;
%bode(TT1);
```

```
%% Dois termos:
```

```
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B15;
bode(TT2);
```

```
%% Três termos:
```

```
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B15;
%%bode(TT3);
```

```
%% Quatro termos:
```

```
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B15;
%%bode(TT4);
```

```
%% Cinco termos:
```

```
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
```

```

T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B15;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B15;
%%bode(TT6)

%% Parâmetros para n=20(número de coils)

num3=[2.1907*10^-34 1.5672*10^-23 1.6301*10^-16 1.69*10^-7 1.73];
den3=[9.033*10^-30 6.465*10^-19 6.606*10^-12 2.18369*10^-4 1.73];
Cir1_B20=tf(num3,den3)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B20;
%%bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B20;
%%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;

```

```

TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B20;
%%bode(TT3);

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B20;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B20;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B20;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=30(número de coils)

num4=[6.23837*10^-34 1.138755*10^-23 4.583*10^-16 1.72*10^-7 6.78];
den4=[5.344*10^-29 9.75834*10^-19 3.8453*10^-11 2.37472*10^-4 6.78];
Cir1_B30=tf(num4,den4)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B30;
%%bode(TT1);

```

```

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B30;
%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B30;
%%bode(TT3);

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B30;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B30;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;

```

```

TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B30;
bode(TT6)

```

```

%% Parâmetros para n=50(número de coils)

```

```

num5=[1.3885*10^-33 1.548129*10^-23 1.0145*10^-15 1.72*10^-7 11.1];
den5=[3.39968*10^-28 3.7913*10^-18 2.44625*10^-10 5.45672*10^-4 11.1];
Cir1_B50=tf(num5,den5)

```

```

%% Apenas um termo:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B50;
%%bode(TT1);

```

```

%% Dois termos:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;
TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B50;
%bode(TT2);

```

```

%% Três termos:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B50;
%%bode(TT3);

```

```

%% Quatro termos:

```

```

w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=l*T4;

```

```

TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B50;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B50;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B50;
bode(TT6)

%% Parâmetros para n=200(número de coils)

num6=[1.015247*10^-29 5.9758*10^-23 5.6064*10^-14 1.65*10^-7 77.4];
den6=[8.578796*10^-28 1.694*10^-20 2.3967*10^-12 3.3*10^-5 77.4];
Cir1_B200=tf(num6,den6)

%% Apenas um termo:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
numt1=[0 0 w1];
dent1=[1 0 w11];
T1=tf(numt1,dent1);
T1d=d*T1;
TT1=T1d*Cir1_B200;
bode(TT1);

%% Dois termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w2=3*w1;
w22=w2^2;
numt2=[0 0 w2];
dent2=[1 0 w22];
T2=tf(numt2,dent2);
T2g=g*T2;

```

```

TT2s=T1d+T2g;
TT2=TT2s*Cir1_B200;
%bode(TT2);

%% Três termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w3=5*w1;
w33=w3^2;
numt3=[0 0 w3];
dent3=[1 0 w33];
T3=tf(numt3,dent3);
T3s=s*T3;
TT3s=T1d+T2g+T3s;
TT3=TT3s*Cir1_B200;
%bode(TT3);

%% Quatro termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w4=7*w1;
w44=w4^2;
numt4=[0 0 w4];
dent4=[1 0 w44];
T4=tf(numt4,dent4);
T4l=1*T4;
TT4s=T1d+T2g+T3s+T4l;
TT4=TT4s*Cir1_B200;
%%bode(TT4);

%% Cinco termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w5=9*w1;
w55=w5^2;
numt5=[0 0 w5];
dent5=[1 0 w55];
T5=tf(numt5,dent5);
T5o=o*T5;
TT5s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o;
TT5=TT5s*Cir1_B200;
%bode(TT5);

%% Seis termos:
w1=2*pi*10^7;
w11=w1^2
w6=11*w1;
w66=w6^2;
numt6=[0 0 w6];
dent6=[1 0 w66];
T6=tf(numt6,dent6);
T6q=q*T6;
TT6s=T1d+T2g+T3s+T4l+T5o+T6q;
TT6=TT6s*Cir1_B200;
%bode(TT6)

```