

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**João Victor Barbosa Fernandes**

**Estudo de Modelo de Falta de Alta  
Impedância via Simulação de  
Transitórios Eletromagnéticos em  
Sistemas de Distribuição**



**João Victor Barbosa Fernandes**

**Estudo de Modelo de Falta de Alta  
Impedância via Simulação de  
Transitórios Eletromagnéticos em  
Sistemas de Distribuição**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de  
Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F62e                      Fernandes, João Victor Barbosa  
                                Estudo de Modelo de Falta de Alta Impedância via  
                                Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas  
                                de Distribuição / João Victor Barbosa Fernandes;  
                                orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. São  
                                Carlos, 2017.

                                Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
                                ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
                                Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
                                2017.

                                1. Falta de Alta Impedância. 2. Distúrbios. 3.  
                                Espectro harmônico. 4. Sistemas de distribuição. I.  
                                Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: João Victor Barbosa Fernandes

Título: “Análise de distúrbios causados por faltas de alta impedância em sistemas de distribuição”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 29 / 11 / 2017,

com NOTA 7,0 ( sete, zero ), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - Orientador -  
SEL/EESC/USP*

*Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino - SEL/EESC/USP*

*Mestre Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli - Doutorando -  
SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino



---

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente minha família e amigos, por toda a formação de caráter e por todo o apoio nas mais diversas situações da minha vida. Ao meu orientador Professor Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior por todo o apoio e dedicação e ao Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli, por todo o conhecimento e disposição a me ajudar.





---

# Resumo

Fernandes, João Victor Barbosa **Estudo de Modelo de Falta de Alta Impedância via Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Distribuição**. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

Este trabalho analisa os efeitos de faltas de alta impedância em um sistema de distribuição de energia elétrica, verificando os distúrbios causados nas correntes medidas na subestação de distribuição. As simulações consistem em aplicar faltas em diferentes pontos de um sistema de distribuição e medir as correntes na subestação. Para realizar esses testes, foi escolhido um modelo elétrico equivalente à falta (para representar alguns de seus fenômenos) e o *software* ATP DRAW foi utilizado como simulador. A partir das medições de corrente, obteve-se o respectivo espectro harmônico (via *software* MATLAB) e buscou-se padrões que indiquem se é possível identificar a ocorrência da falta por meio das componentes harmônicas. Como resultados, verificou-se que a componente fundamental do espectro de frequência pode ser um indicativo da distância da falta à subestação e que as componentes harmônicas, em especial a 3<sup>a</sup> e a 5<sup>a</sup>, são mais propensas a indicarem a ocorrência da falta.

**Palavras-chave:** Falta de Alta Impedância. Distúrbios. Espectro harmônico. Sistemas de distribuição.



---

# Abstract

Fernandes, João Victor Barbosa **Study of High Impedance Fault Model via Eletromagnetic Transients Simulation in Distribution Systems.** 80 p. Undergraduate Final Project – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2017.

This paper analyzes the effects of high impedance faults in a electrical distribution system, verifying the disturbances caused in the currents measured at the distribution substation. The simulations consist of applying faults at different points in a distribution system and measuring the currents in the substation. To perform these tests, an equivalent high impedance fault model was chosen (to represent its main characteristics) and the simulations were carried out by using ATP DRAW *software*. From the current measurements, the corresponding harmonic spectrum was obtained (via MATLAB) and patterns were established that indicate if it is possible to identify the occurrence of the fault through the harmonic components. As a result, it can be seen that the fundamental component of the frequency spectrum may be an indicative of the distance from the fault to the substation and that the harmonic components, especially the 3rd and 5th, are more likely to indicate the occurrence of the fault.

**Keywords:** High Impedance Fault. Disturbances. Harmonic spectrum. Distribution systems.



---

## Lista de ilustrações

Figura 1	Rompimento do condutor . . . . .	22
Figura 2	Corrente de falta com fenômeno de <i>buildup</i> . . . . .	24
Figura 3	Corrente de falta com fenômeno de <i>shoulder</i> . . . . .	25
Figura 4	Modelo 1985 . . . . .	27
Figura 5	Modelo 1990 . . . . .	28
Figura 6	Modelo 1993 . . . . .	29
Figura 7	Modelo 2006 . . . . .	29
Figura 8	Parâmetros do modelo utilizado . . . . .	32
Figura 9	Circuito com duas cargas e o modelo de FAI . . . . .	34
Figura 10	Simulação 1 - Cenário 1: Corrente de falta . . . . .	35
Figura 11	Simulação 1 - Cenário 1: Espectro Harmônico . . . . .	36
Figura 12	Simulação 1 - Cenário 12: Corrente de falta . . . . .	36
Figura 13	Simulação 1 - Cenário 12: Espectro Harmônico . . . . .	37
Figura 14	Simulação 1 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a variação da tensão de ignição de arco . . . . .	38
Figura 15	Simulação 1 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a variação da tensão de ignição de arco . . . . .	38
Figura 16	Simulação 2 - Cenário 1: Corrente de falta . . . . .	40
Figura 17	Simulação 2 - Cenário 1: Espectro Harmônico . . . . .	40
Figura 18	Simulação 2 - Cenário 12: Corrente de falta . . . . .	41
Figura 19	Simulação 2 - Cenário 12: Espectro Harmônico . . . . .	41
Figura 20	Simulação 2 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a variação da resistência de falta . . . . .	42
Figura 21	Simulação 2 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a variação da resistência de falta . . . . .	43
Figura 22	Simulação 3 - Cenário 1: Corrente de falta . . . . .	44
Figura 23	Simulação 3 - Cenário 1: Espectro Harmônico . . . . .	45

Figura 24	Simulação 3 - Cenário 20: Corrente de falta . . . . .	45
Figura 25	Simulação 3 - Cenário 20: Espectro Harmônico . . . . .	46
Figura 26	Simulação 3 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a diferença entre as tensões de ignição de arco . . . . .	46
Figura 27	Simulação 3 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a diferença entre as tensões de ignição de arco . . . . .	47
Figura 28	Simulação 4 - Cenário 1: Corrente de falta . . . . .	48
Figura 29	Simulação 4 - Cenário 1: Espectro Harmônico . . . . .	49
Figura 30	Simulação 4 - Cenário 20: Corrente de falta . . . . .	49
Figura 31	Simulação 4 - Cenário 20: Espectro Harmônico . . . . .	50
Figura 32	Simulação 4 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a diferença entre as resistências de falta . . . . .	51
Figura 33	Simulação 4 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a diferença entre as resistências de falta . . . . .	51
Figura 34	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 34 Barras . . . . .	54
Figura 35	Sistema IEEE 34 Barras, separado por zonas. . . . .	54
Figura 36	FAI aplicada por meio de simulação no <i>software</i> ATP DRAW. . . . .	55
Figura 37	Sistema IEEE 34 Barras com destaque para as barras utilizadas na simulação de contato direto . . . . .	57
Figura 38	FAI por Contato Direto - Amplitude do 1º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	58
Figura 39	FAI por Contato Direto - Amplitude do 2º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	58
Figura 40	FAI por Contato Direto - Amplitude do 3º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	59
Figura 41	FAI por Contato Direto - Amplitude do 4º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	59
Figura 42	FAI por Contato Direto - Amplitude do 5º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	60
Figura 43	FAI por Contato Direto - Distorção Harmônica Total (DHT) $\times$ distância da subestação . . . . .	61
Figura 44	Sistema IEEE 34 Barras com destaque para as barras utilizadas na simulação de contato indireto . . . . .	62
Figura 45	FAI por Contato Indireto - Amplitude do 1º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	62
Figura 46	FAI por Contato Indireto - Amplitude do 2º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	63
Figura 47	FAI por Contato Indireto - Amplitude do 3º Harmônico $\times$ distância da subestação . . . . .	63

Figura 48	FAI por Contado Indireto - Amplitude do 4º Harmônico × distância da subestação . . . . .	64
Figura 49	FAI por Contado Indireto - Amplitude do 5º Harmônico × distância da subestação . . . . .	64
Figura 50	FAI por Contado Indireto - Distorção Harmônica Total (DHT) × distância da subestação . . . . .	65
Figura 51	FAI por Contado Indireto - Amplitude do 1º Harmônico × distância da subestação - Sit1 sem reguladores . . . . .	66
Figura 52	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 1º Harmônico × distância da subestação . . . . .	77
Figura 53	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 2º Harmônico × distância da subestação . . . . .	78
Figura 54	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 3º Harmônico × distância da subestação . . . . .	78
Figura 55	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 4º Harmônico × distância da subestação . . . . .	79
Figura 56	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 5º Harmônico × distância da subestação . . . . .	79
Figura 57	FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Distorção Harmônica Total (DHT) × distância da subestação . . . . .	80





---

## Lista de tabelas

Tabela 1	Correntes de falta para diferentes tipos de solo . . . . .	23
Tabela 2	Conteúdo espectral dos harmônicos pares e ímpares de falta em solo úmido e seco . . . . .	26
Tabela 3	Simulação 1: Parâmetros utilizados . . . . .	35
Tabela 4	Simulação 2: Parâmetros utilizados . . . . .	39
Tabela 5	Simulação 3: Parâmetros utilizados . . . . .	44
Tabela 6	Simulação 4: Parâmetros utilizados . . . . .	48
Tabela 7	Situação 1: Parâmetros Utilizados . . . . .	56
Tabela 8	Situação 2: Parâmetros Utilizados . . . . .	56
Tabela 9	Situação 3: Parâmetros Utilizados . . . . .	56
Tabela 10	Situação 4: Parâmetros Utilizados . . . . .	56



---

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Objetivos . . . . .	19
1.2	Estrutura do documento . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Falta de Alta Impedância</b>	<b>21</b>
2.1	Características . . . . .	21
2.1.1	Rompimento e queda do condutor primário . . . . .	21
2.1.2	Corrente drenada . . . . .	22
2.1.3	Arco elétrico . . . . .	23
2.2	Espectro de Baixa Frequência (EBF) . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Modelos Elétricos para Falhas de Alta Impedância</b>	<b>27</b>
3.1	Modelo de (LEE; BISHOP, 1985) . . . . .	27
3.2	Modelo de (EMANUEL et al., 1990) . . . . .	28
3.3	Modelo de (SHARAF; SNIDER; DEBNATH, 1993) . . . . .	28
3.4	Modelo de (LAI; SNIDER; LO, 2006) . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Estudo do Modelo Utilizado</b>	<b>31</b>
4.1	Valores típicos da literatura para os parâmetros do modelo utilizado . . . . .	31
4.2	Transformada de Fourier (TF) . . . . .	32
4.3	Distorção Harmônica Total (DHT) . . . . .	32
4.4	Simulações em um sistema de uma barra . . . . .	33
4.4.1	Simulação 1 - Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores iguais nos ramos) . . . . .	34
4.4.2	Simulação 2 - Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores iguais nos ramos) . . . . .	39
4.4.3	Simulação 3 - Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores diferentes nos ramos) . . . . .	43

4.4.4	Simulação 4 - Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores diferentes nos ramos) . . . . .	47
4.5	Considerações finais sobre o capítulo . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Análise de distúrbios no sistema de 34 barras do IEEE</b>	<b>53</b>
5.1	Sistema de 34 barras do IEEE . . . . .	53
5.2	Estrutura do estudo . . . . .	54
5.3	FAI por Contato Direto - Com Perda de Carga . . . . .	57
5.4	FAI por Contato Indireto - Sem Perda de Carga . . . . .	61
5.5	Análise dos resultados . . . . .	66
5.5.1	FAI por Contato Direto - Com Perda de Carga . . . . .	66
5.5.2	FAI por Contato Indireto - Sem Perda de Carga . . . . .	67
	<b>Conclusão</b>	<b>69</b>
	<b>Referências</b>	<b>71</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE A FAI por Contato Direto - Outros Cenários</b>	<b>77</b>

---

# Introdução

Um sistema de distribuição de energia elétrica está suscetível à ocorrência de faltas, muitas vezes de difícil detecção. Se ocorre o rompimento de um condutor, ele pode entrar em contato com uma superfície de alta resistência elétrica (quase isolante) - como, por exemplo, árvores, edificações, automóveis, diferentes tipos de solo, entre outros. Essa situação caracteriza uma Falta de Alta Impedância (FAI) e, devido à elevada resistência elétrica no contato, gera correntes relativamente baixas (de poucos mA até 75A), dificultando sua detecção por dispositivos convencionais de proteção (WESTER, 1998).

O *Power System Relaying and Control Committee* (PSRC), comitê do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), define falta de alta impedância como qualquer falta que apresente amplitude de corrente menor do que os limites mínimos de detecção dos dispositivos de proteção (IEEE, 1996).

Uma FAI pode ocorrer por contato direto do cabo com o solo ou de maneira indireta, quando o cabo toca alguma superfície (uma árvore, por exemplo). Em decorrência da não linearidade que apresentam entre tensão e corrente, as FAI introduzem harmônicos na rede, comprometendo a qualidade da energia entregue aos consumidores (CHEN et al., 2013). Além disso, representam riscos a seres vivos: dados de acidentes no Brasil, nos períodos de 1991 a 1994 e de 2001 a 2003, apontam que as FAI causaram - em média - 53,6 mortes ao ano (OLIVEIRA JÚNIOR, 2006).

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é entender como uma falta de alta impedância influencia nas correntes de um sistema de distribuição. Por meio da análise do espectro harmônico das correntes medidas na subestação, busca-se encontrar padrões que indiquem a existência deste tipo de falta. Para atingir esse objetivo, a proposta consiste em escolher um modelo elétrico que represente a FAI e realizar simulações no *software* ATP DRAW utilizando parâmetros encontrados na literatura.

O interesse em medir as correntes na subestação se dá pela inviabilidade econômica da instalação de medidores em muitos pontos do sistema. Portanto, a proposta é analisar os harmônicos gerados por uma FAI que, ao serem lidos na subestação, possam indicar a ocorrência desta falha.

## 1.2 Estrutura do documento

Este documento está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 é composto por uma sucinta revisão acerca das principais características de uma Falta de Alta Impedância.

O Capítulo 3 mostra alguns modelos elétricos apresentados na literatura (que simulam uma FAI) e define o que foi utilizado nas simulações deste trabalho.

O Capítulo 4 contém simulações de faltas aplicadas em um sistema teórico de uma única barra, com o propósito de entender o funcionamento do modelo elétrico escolhido. No início do capítulo são apresentados alguns valores típicos da literatura para os parâmetros do modelo e para valores de corrente de FAI. Além disso, há uma breve descrição sobre Transformada de Fourier e Distorção Harmônica Total.

As simulações de FAI em diferentes pontos de um sistema de distribuição de 34 barras são apresentadas no Capítulo 5. As análises dos resultados obtidos estão estruturadas de acordo com as diferentes combinações de parâmetros utilizados.

Em seguida, são apresentadas as conclusões obtidas de todas as análises, assim como referências bibliográficas e apêndices.

## Falta de Alta Impedância

Este capítulo tratará da ocorrência de uma falta de alta impedância (do rompimento do condutor até o toque no solo) e de suas consequências e efeitos. Será detalhado o surgimento do arco elétrico e serão apresentados os valores típicos de corrente de falta, encontrados na literatura, além das diferenças entre os diferentes tipos de solo.

### 2.1 Características

#### 2.1.1 Rompimento e queda do condutor primário

Este trabalho estuda faltas de alta impedância que ocorram em uma única fase de um sistema de distribuição em tensão de 24,9 kV, com contato direto do cabo com o solo. O surgimento de uma FAI se dá em três etapas: (i) rompimento do condutor da rede primária, (ii) queda do condutor e (iii) toque do condutor no solo. Previamente ao surgimento, considera-se que todas as correntes circulando no sistema sejam devidas às cargas. Além disso, admite-se que durante a queda não há contato entre o cabo rompido e outras fases ou neutro.

O tempo de queda do condutor pode ser calculado pela seguinte equação (NAKAGOMI, 2006):

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} [s] \quad (1)$$

Sendo:

h = altura da rede primária ao solo [m]

g = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>]

Para as análises deste trabalho, foi considerada uma altura da rede primária em relação ao solo de 8m (NAKAGOMI, 2006), resultando em um tempo de queda de aproximadamente 1,28 s, de acordo com a Equação 1.

Quando o condutor toca o solo, há o surgimento de um arco elétrico (não necessariamente de imediato), que será explicado na Subseção 2.1.3. O cabo pode tocar o solo a

montante ou a jusante do ponto de falta, como mostrado na Figura 1. Neste trabalho, será considerado o caso da Figura 1(a) (tocando o solo pelo lado da subestação, pois é nesta que serão realizadas as medições).

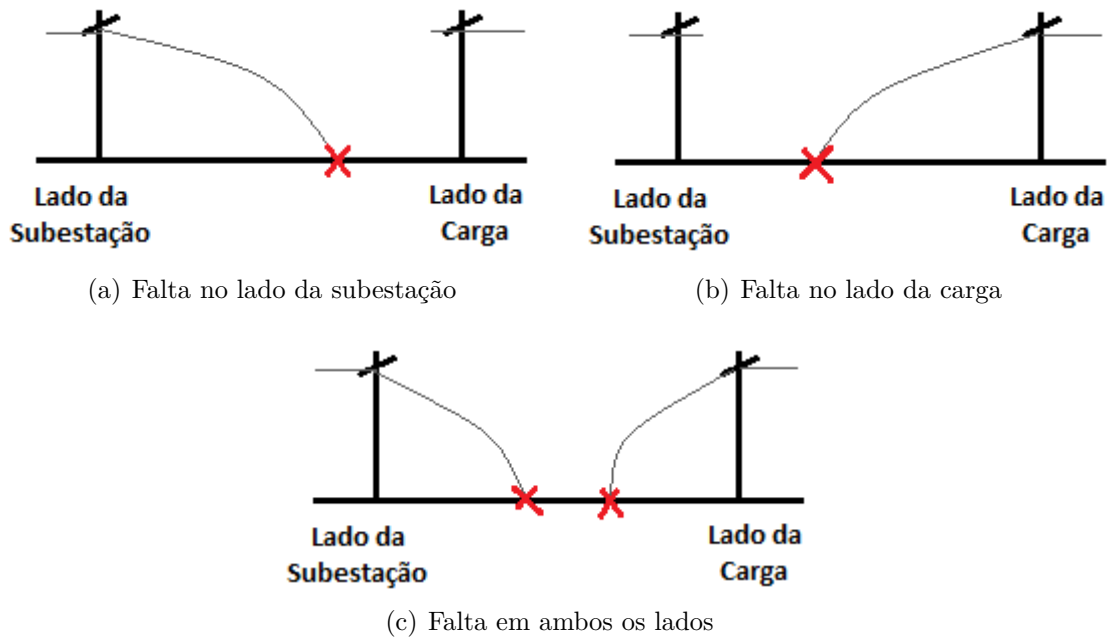


Figura 1 – Rompimento do condutor. *Adaptado de:* (NAKAGOMI, 2006).

### 2.1.2 Corrente drenada

Como mencionado anteriormente, o foco deste trabalho é nas faltas em que o cabo tem contato direto com o solo. A magnitude da corrente de falta depende do tipo de solo e, para determinar valores típicos de corrente de FAI, alguns estudos da literatura foram levados em consideração.

Em (LAZKANO et al., 2000), num sistema de distribuição de 20 kV a 30 km da subestação, foram provocadas trinta e duas FAI, em diversos tipos de solo e condições de umidade. A Tabela 1 mostra o valor de corrente eficaz encontrado para cada caso. As correntes de falta variaram de 36 mA até 62 A.

Outros estudos apontam faixas similares:

- 0 a 50 A (CALHOUN et al., 1982)
- 10 a 50 A (CHEN et al., 2013)
- 0 a 75 A (WESTER, 1998)

É possível, então, estabelecer que a faixa típica de valores de corrente de FAI vai de 0 a 75 A. Essa faixa será considerada nas simulações desta pesquisa.



Tabela 1 – Correntes de falta para diferentes tipos de solo. *Adaptado de:* (LAZKANO et al., 2000)

Solo	Condição	Corrente Eficaz
areia	molhada	25,64 A
	seca	14,39 A
asfalto	molhado	36,64 mA
	seco	95,94 mA
gramado	molhado	57,18 A
cascalho grosso	molhado	31,24 A
	seco	114,5 mA
cascalho fino	seco	28,89 A
concreto	molhado	62,92 A
	seco	32,08 A
terra	molhada	46,73 A
	seca	10,52 A
árvore (conífera)	molhada	38,13 A
	seca	22,56 A

### 2.1.3 Arco elétrico

Os distúrbios causados na rede de distribuição pelas FAI podem ser confundidos com operações de chaveamento comuns nesse tipo de rede (CHEN et al., 2013). Com isso em mente, torna-se necessário encontrar características únicas de uma FAI, para que seja possível diferenciá-la de outros eventos. A particularidade mais distinta de uma FAI é o arco elétrico, que traz à falta uma característica de natureza complexa.

Os arcos elétricos produzem calor intenso, podendo causar ondas de pressão e explosões, o que os torna em um grande risco para pessoas e animais que sofram exposição (FLOYD et al., 2005). Isso reforça a necessidade da correta detecção de uma FAI, para que o problema seja resolvido rapidamente.

Para simular uma FAI computacionalmente, o modelo escolhido deve conseguir representar características do arco, que são mostradas a seguir:

- **Desbalanço entre os semiciclos de tensão e corrente**

No semiciclo positivo, a corrente possui amplitude maior em relação ao semiciclo negativo, enquanto a tensão apresenta menor amplitude. É essa assimetria que causa o surgimento de componente de segundo harmônico no espectro, no entanto não tem grande influência no terceiro harmônico (EMANUEL et al., 1990).

- **Avalanche**

Processo de ionização do ar que ocorre rapidamente quando o cabo toca o solo e permite que ocorra a condução de energia elétrica pelo ar. Isso permite, então, que um arco elétrico seja formado (KWON et al., 1989).

- **Intermitência**

Também conhecido como centelhamento, é o início do processo de formação do arco, podendo ocorrer diversas vezes até que o arco se estabeleça. Este fenômeno é responsável pela geração de componentes harmônicos de alta frequência (NAKAGOMI, 2006).

- **Buildup**

Este fenômeno constitui-se do aparecimento de um envoltório crescente na forma de onda de corrente, pois a amplitude desta vai aumentando até atingir seu valor máximo (FANUCCHI, 2014), como exemplificado na Figura 2.

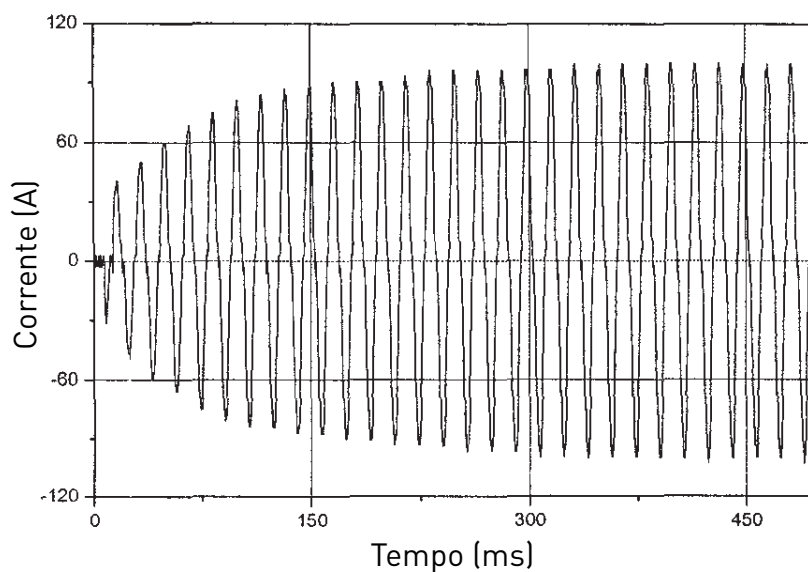


Figura 2 – Corrente de falta com fenômeno de *buildup*. Adaptado de: (NAM et al., 2001)

- **Shoulder**

Muitas vezes o *buildup* é acompanhado por um outro fenômeno denominado *shoulder*. Também chamado de patamar de tensão, constitui períodos em que a amplitude da corrente é mantida constante, ou seja, seu crescimento é interrompido (JEERINGS; LINDERS, 1989), como mostrado na Figura 3.

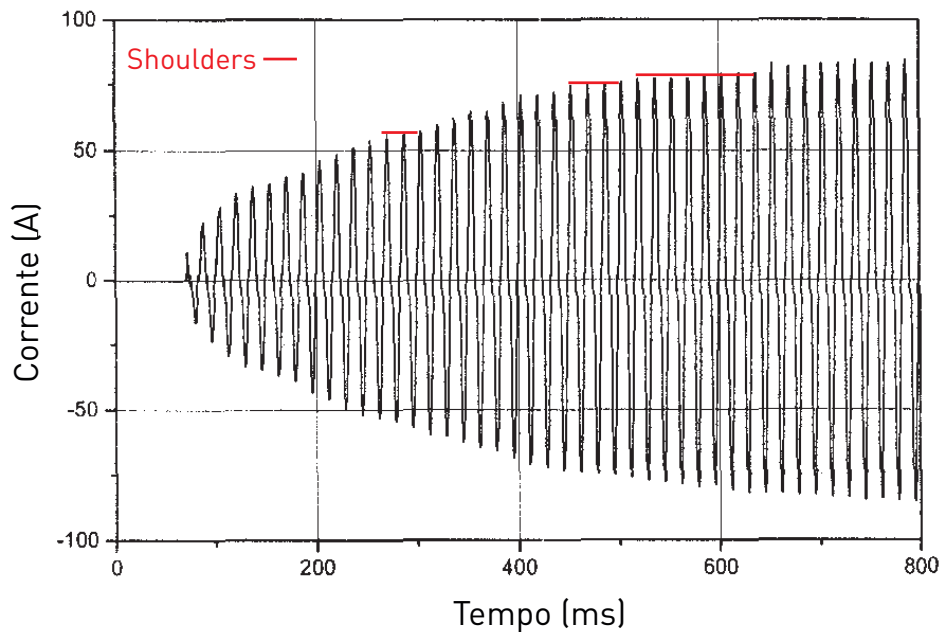


Figura 3 – Corrente de falta com fenômeno de *shoulder*. Adaptado de: (NAM et al., 2001)

## 2.2 Espectro de Baixa Frequência (EBF)

Esta seção apresenta alguns estudos com valores típicos das componentes harmônicas para uma FAI, que serão utilizados como base de comparação com as simulações deste trabalho.

Como espera-se ter amplitudes maiores nas primeiras componentes do espectro, o EBF, que compreende a faixa de frequências abaixo de 2 kHz (AUCOIN; RUSSELL, 1989), será o único analisado neste trabalho. Frequências mais altas não serão consideradas.

Um estudo em um sistema de 12,5 kV realizou 80 medidas em solos úmidos e secos (RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988). Os valores das componentes harmônicas estão mostrados na Tabela 2, evidenciando a predominância de harmônicos ímpares.

Outro estudo (com tensão de 7,9 kV, feito em laboratório) (EMANUEL et al., 1990) constatou que correntes com frequência acima de 180 Hz não apresentam valores estáveis. Isso reforça a escolha deste trabalho de analisar apenas as primeiras componentes do espectro harmônico.

Tabela 2 – Conteúdo espectral dos harmônicos pares e ímpares de falta em solo úmido e seco. *Adaptado de:* (RUSSELL; CHINCHALI; KIM, 1988)

<b>Harmônicos Ímpares</b>			<b>Harmônicos Pares</b>		
Ordem	Local 1 (úmido)	Local 2 (seco)	Ordem	Local 1 (úmido)	Local 2 (seco)
	(% do componente fundamental)			(% do componente fundamental)	
1	100	100	2	0,14	0,85
3	0,83	2,90	4	0,16	0,87
5	0,35	4,50	6	0,24	0,75
7	1,00	2,30	8	0,06	0,51
9	0,50	1,10	10	0,10	0,31
11	0,38	0,73	12	0,11	0,37
13	0,19	0,37	14	0,07	0,34
15	0,10	0,31	16	0,11	0,26
17	0,09	0,35	18	0,07	0,34
19	0,09	0,25	20	0,06	0,24

---

# Modelos Elétricos para Falhas de Alta Impedância

Para simular computacionalmente uma falta de alta impedância, é necessário utilizar um modelo elétrico que represente suas características. Alguns fenômenos de FAI foram descritos na Subseção 2.1.3 (*buildup*, *shoulder*, intermitência, desbalanço entre os semiciclos, comportamento aleatório).

Existem diversos modelos na literatura que, dependendo da complexidade, representam poucas ou várias das características de uma FAI. Neste capítulo serão apresentados alguns desses modelos, com suas principais características, e um deles será escolhido para as simulações.

## 3.1 Modelo de (LEE; BISHOP, 1985)

Este é o mais simples dos modelos: é composto apenas por uma resistência entre o ponto de falta e a terra, como mostrado na Figura 4. A resistência não gera distorção na forma de onda da corrente, portanto este modelo não consegue representar a não-linearidade de uma falta com arco.

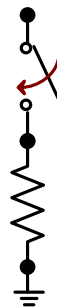


Figura 4 – Modelo 1985. *Adaptado de:* (LEE; BISHOP, 1985).

### 3.2 Modelo de (EMANUEL et al., 1990)

Este modelo, mostrado na Figura 5, consegue simular o efeito de avalanche. No entanto, os efeitos de *buildup* e *shoulder*, além do espectro de alta frequência, não podem ser representados. O espectro de baixa frequência também não é representado em sua totalidade, já que não é possível estruturar cada semiciclo de maneira separada e detalhada.

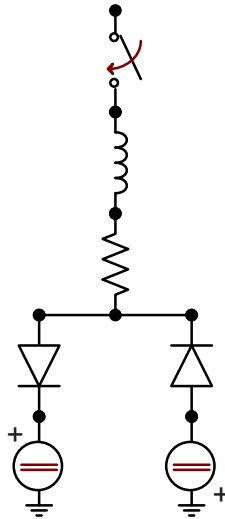


Figura 5 – Modelo 1990. Adaptado de: (EMANUEL et al., 1990).

### 3.3 Modelo de (SHARAF; SNIDER; DEBNATH, 1993)

Este modelo contempla uma faixa espectral maior, em relação ao de (EMANUEL et al., 1990), pois permite um maior controle sobre a assimetria entre os semiciclos (graças à resistência não-linear). Contudo, também não consegue representar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*, além do espectro de alta frequência. A configuração proposta é mostrada na Figura 6.

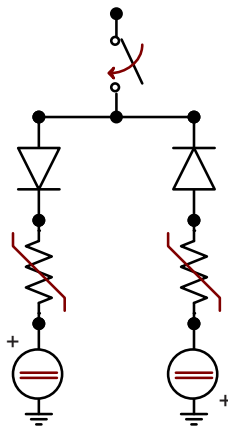


Figura 6 – Modelo 1993. Adaptado de: (SHARAF; SNIDER; DEBNATH, 1993).

### 3.4 Modelo de (LAI; SNIDER; LO, 2006)

O modelo de FAI escolhido para realizar simulações neste trabalho foi o de (LAI; SNIDER; LO, 2006), ilustrado na Figura 7.

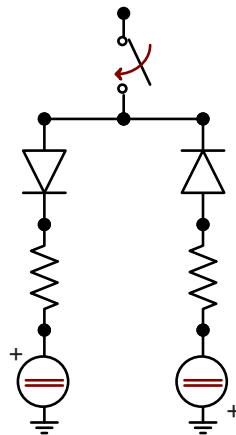


Figura 7 – Modelo 2006. Adaptado de: (LAI; SNIDER; LO, 2006)

Com esse modelo é possível representar a assimetria entre os semiciclos de corrente, já que a impedância de falta é representada por duas resistências que podem assumir valores diferentes. As fontes CC representam a tensão de ignição do arco. Como ponto negativo, não é possível representar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*, nem o espectro de alta frequência e intermitência, portanto esse modelo não representa de forma completa uma FAI.

Apesar de não ser completo, este modelo é muito utilizado na literatura por possuir componentes fáceis de serem parametrizados. No Capítulo 4 será mostrado um estudo deste modelo, visando estender seu comportamento frente a variações dos parâmetros, e o Capítulo 5 apresentará simulações de FAI com este modelo em um sistema elétrico de 34 barras.





---

## Estudo do Modelo Utilizado

Este capítulo mostrará valores típicos da literatura para corrente de FAI e para os parâmetros do modelo de (LAI; SNIDER; LO, 2006) escolhido. Além disso, explicará brevemente a Transformada de Fourier, que será utilizada para obter o espectro harmônico das correntes, e a distorção harmônica total. Em seguida, serão mostradas simulações de faltas em um sistema fictício de apenas uma barra, com o intuito de entender como o modelo elétrico escolhido se comporta de acordo com as variações dos parâmetros.

### 4.1 Valores típicos da literatura para os parâmetros do modelo utilizado

Para estudar o modelo com valores próximos aos da realidade de uma FAI, alguns valores típicos de corrente e dos parâmetros do modelo utilizado foram obtidos da literatura e estão mostrados na Figura 8. Os parâmetros desta figura são definidos a seguir:

- $V_p$  [V] = tensão do ramo positivo (esquerdo) do modelo
- $V_n$  [V] = tensão do ramo negativo (direito) do modelo
- $R_p$  [ $\Omega$ ] = resistência do ramo positivo (esquerdo) do modelo
- $R_n$  [ $\Omega$ ] = resistência do ramo negativo (direito) do modelo

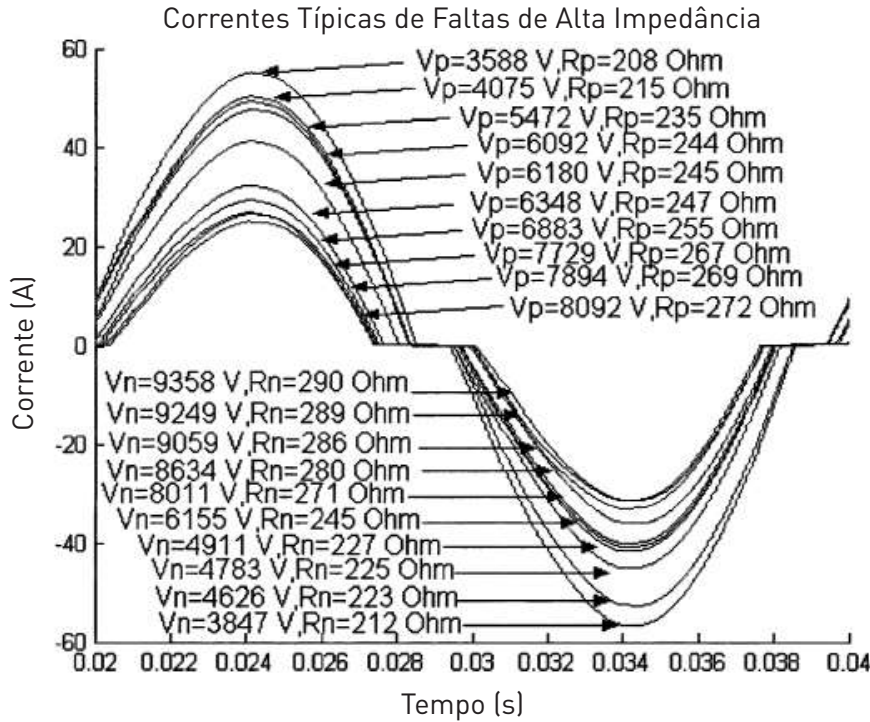


Figura 8 – Parâmetros do modelo utilizado. *Adaptado de:* (LAI et al., 2005)

## 4.2 Transformada de Fourier (TF)

Para analisar o espectro harmônico das correntes medidas, é necessário levar as informações do tempo para o domínio da frequência. Como os dados são finitos (discretos), a Transformada Discreta de Fourier (TDF) pode ser utilizada, pois converte uma sequência no tempo discreto para o domínio da frequência discreta. A Equação 2 representa a TDF de uma sequência com  $N$  amostras (SIMAS, 2012).

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

Para aplicar a TDF no *software* MATLAB, foi utilizado o algoritmo Fast Fourier Transform (FFT), que reduz o número de iterações computacionais necessárias pro cálculo da TDF (MATHWORKS, 2017).

## 4.3 Distorção Harmônica Total (DHT)

A Distorção Harmônica Total (DHT) mede a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda, seja para tensão como para corrente. Os cálculos são feitos pelas

equações 3 e 4 (RODRIGUES, 2010).

$$DHT_V = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} V_h^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$DHT_i = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Sendo:

$V_h$  - Valor eficaz da tensão de ordem h

$I_h$  - Valor eficaz da corrente de ordem h

$V_1$  - Valor eficaz da tensão fundamental

$I_1$  - Valor eficaz da corrente fundamental

$h$  - Ordem da componente harmônica

Por meio da análise da  $DHT_i$  será possível dizer o quão distorcidas estão as ondas de corrente medidas nas simulações dos próximos capítulos.

## 4.4 Simulações em um sistema de uma barra

De modo a analisar o comportamento do modelo escolhido, foram realizadas simulações computacionais com auxílio do *software* “*Alternative Transient Program*” (ATP DRAW). Foi montado um sistema simples com gerador e duas cargas resistivas, sendo o modelo de FAI inserido entre estas. A configuração mencionada é mostrada na Figura 9.

O propósito dessas análises foi verificar como os valores das resistências e das fontes CC dos ramos influenciam no espectro harmônico da corrente de falta. Também foi analisado o impacto da mudança de parâmetros ( $R_3 \neq R_4$  e  $|G_1| \neq |G_2|$ ). Neste primeiro momento, a corrente foi medida diretamente no ponto de falta.

Para gerar os espectros harmônicos, foram exportados os dados de corrente de falta do ATP DRAW para o *software* MATLAB. Neste, foi desenvolvida uma rotina com a função FFT para calcular a Transformada de Fourier da corrente e gerar o espectro desejado.

Foram feitas simulações para quatro casos:

1. **Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores iguais nos ramos)**
2. **Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores iguais nos ramos)**
3. **Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores diferentes nos ramos)**
4. **Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores diferentes nos ramos)**

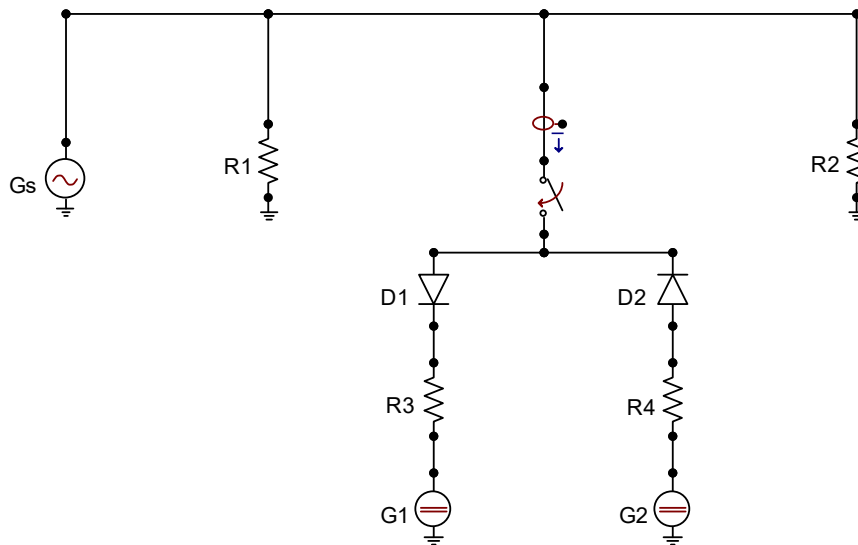


Figura 9 – Circuito com duas cargas e o modelo de FAI

Para cada caso, serão apresentados os parâmetros utilizados no modelo e os resultados obtidos para a corrente de falta e o espectro harmônico. Em todas as simulações, os diodos são ideais e as cargas  $R_1$  e  $R_2$  e o gerador  $G_s$  possuem valores fixos:

$$R_1 = R_2 = 300 \, \Omega$$

$$G_s = 22,9 \, kV$$

Os valores de  $R_1$  e  $R_2$  foram escolhidos arbitrariamente. O valor de  $G_s$  foi escolhido de forma a ficar próximo da tensão do sistema de 34 barras que será mostrado nas próximas simulações.

#### 4.4.1 Simulação 1 - Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores iguais nos ramos)

Para esta simulação, foi adotado (com base nos valores da Seção 4.1)  $R_3 = R_4 = 300 \, \Omega$  e os valores das fontes CC foram ajustados para gerar uma corrente de falta entre 1 e 70 A (de acordo com os valores típicos da literatura - Subseção 2.1.2). Para atender esses requisitos, foram obtidos os parâmetros das fontes CC, mostrados na Tabela 3.

Para uma primeira comparação, são mostrados os cenários 1 e 12. As figuras 10 e 11 mostram a corrente de falta e o espectro harmônico do cenário 1.

A Figura 10 mostra uma corrente de falta bastante distorcida em relação a uma senoide. Isso ocorre pois o valor da tensão de ignição do arco ( $|G_1| = |G_2|$ ) é bastante alto (muito próximo dos 22,9 kV do gerador  $G_s$ ), levando a uma faixa de condução dos diodos muito pequena. Assim, eles conduzem por pouco tempo e geram uma onda distorcida

Tabela 3 – Simulação 1: Parâmetros utilizados

Cenário	Corrente de falta (A)	$G_1$ (V)	$G_2$ (V)
1	1	22600	-22600
2	5	21400	-21400
3	10	19900	-19900
4	15	18400	-18400
5	20	16900	-16900
6	25	15400	-15400
7	30	14000	-14000
8	35	12400	-12400
9	40	11000	-11000
10	45	9400	-9400
11	50	8000	-8000
12	55	6400	-6400
13	60	5000	-5000
14	65	3400	-3400
15	70	2000	-2000

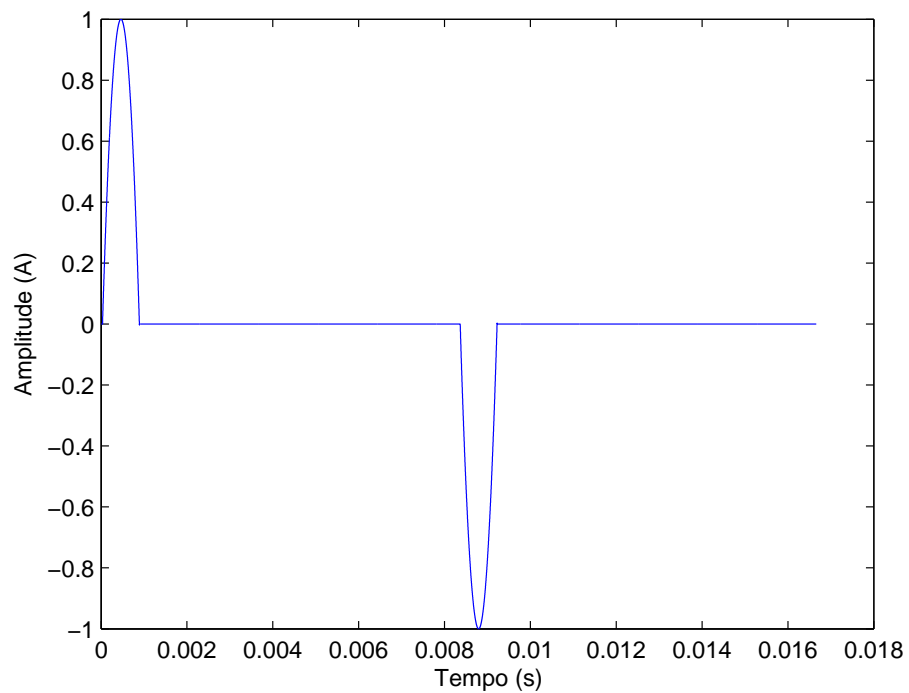


Figura 10 – Simulação 1 - Cenário 1: Corrente de falta

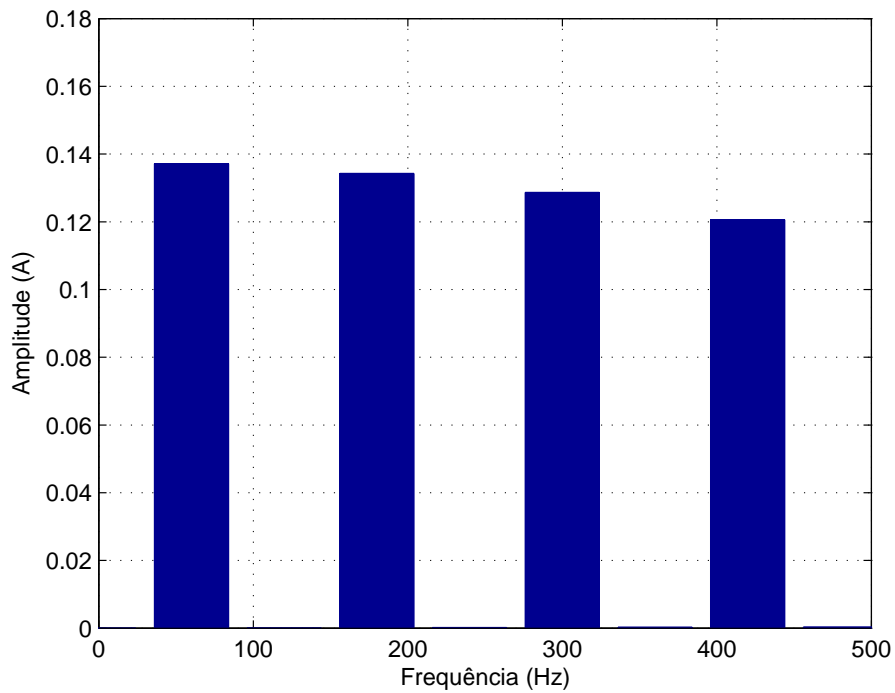


Figura 11 – Simulação 1 - Cenário 1: Espectro Harmônico

de corrente. Essa distorção leva a uma maior presença de frequências harmônicas, como mostrado na Figura 11.

O cenário 12 é representado pelas figuras 12 e 13, que mostram a corrente de falta e o espectro harmônico, respectivamente.

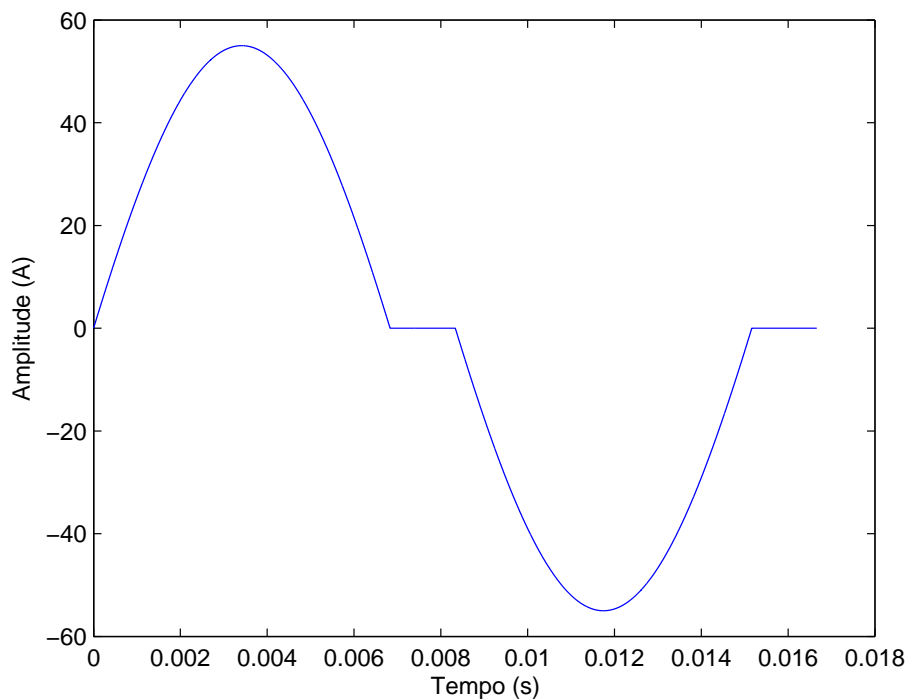


Figura 12 – Simulação 1 - Cenário 12: Corrente de falta

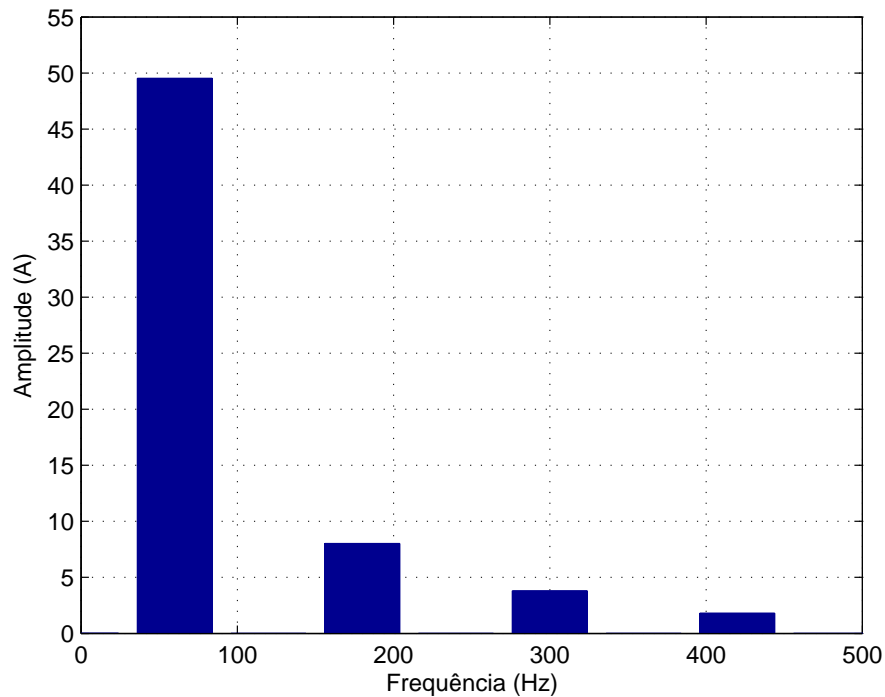


Figura 13 – Simulação 1 - Cenário 12: Espectro Harmônico

A Figura 12 mostra uma corrente menos distorcida, já que a tensão de ignição do arco é bem menor. Com isso, as frequências harmônicas aparecem com amplitudes bem menores em relação à componente fundamental, como mostrado na Figura 13.

As figuras 14 e 15 permitem uma análise do comportamento dos harmônicos com a variação das fontes CC. Para que o comportamento de todas as curvas fique visível, foi adotada a escala logarítmica no eixo vertical.

A Figura 14 mostra que, para a faixa de valores típicos de  $G_1$  (entre 3kV e 9kV) - Figura 8, a amplitude da componente fundamental vai diminuindo com o aumento de  $G_1$ , enquanto a amplitude dos harmônicos vai oscilando, sem um comportamento muito bem definido. Quando o valor de  $G_1$  atinge 22,6 kV e praticamente se iguala ao do gerador (22,9 kV), as amplitudes dos harmônicos tendem a zero, já que praticamente não há condução dos diodos do modelo (corrente praticamente nula). Já a Figura 15 mostra que não há presença de harmônicos pares nessa simulação (as amplitudes são praticamente nulas). É importante lembrar que, nesta Simulação 1,  $G_1 = -G_2$ .

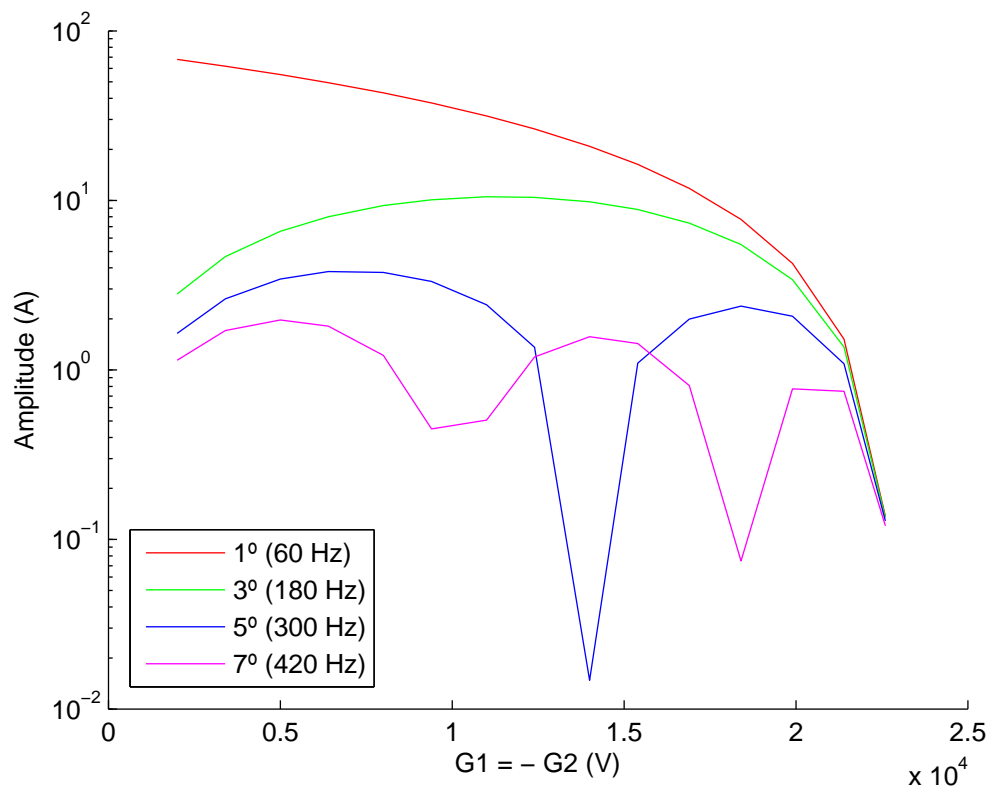


Figura 14 – Simulação 1 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a variação da tensão de ignição de arco

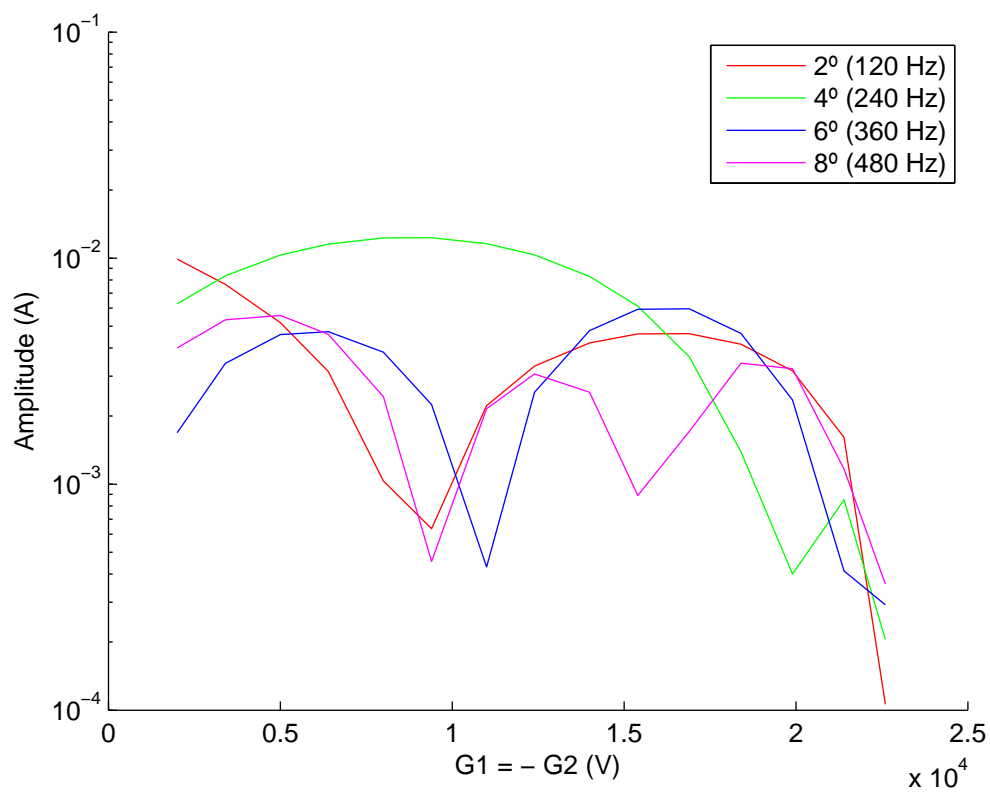


Figura 15 – Simulação 1 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a variação da tensão de ignição de arco



#### 4.4.2 Simulação 2 - Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores iguais nos ramos)

Para esta simulação, foi adotado  $G_1 = 5472 V$  e  $G_2 = -5472 V$  (com base na Figura 8) e os valores das resistências foram ajustados para gerar uma corrente de falta entre 1 e 70 A. Os parâmetros utilizados estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Simulação 2: Parâmetros utilizados

Cenário	Corrente de falta (A)	$R_3 = R_4 (\Omega)$
1	1	17428
2	5	3486
3	10	1743
4	15	1162
5	20	871,40
6	25	697,12
7	30	580,93
8	35	497,94
9	40	435,70
10	45	387,29
11	50	348,56
12	55	316,87
13	60	290,47
14	65	268,12
15	70	248,97

Para esta simulação também são mostrados os cenários 1 e 12. As correntes de falta e espectros harmônicos são mostrados nas figuras 16, 17, 18 e 19.

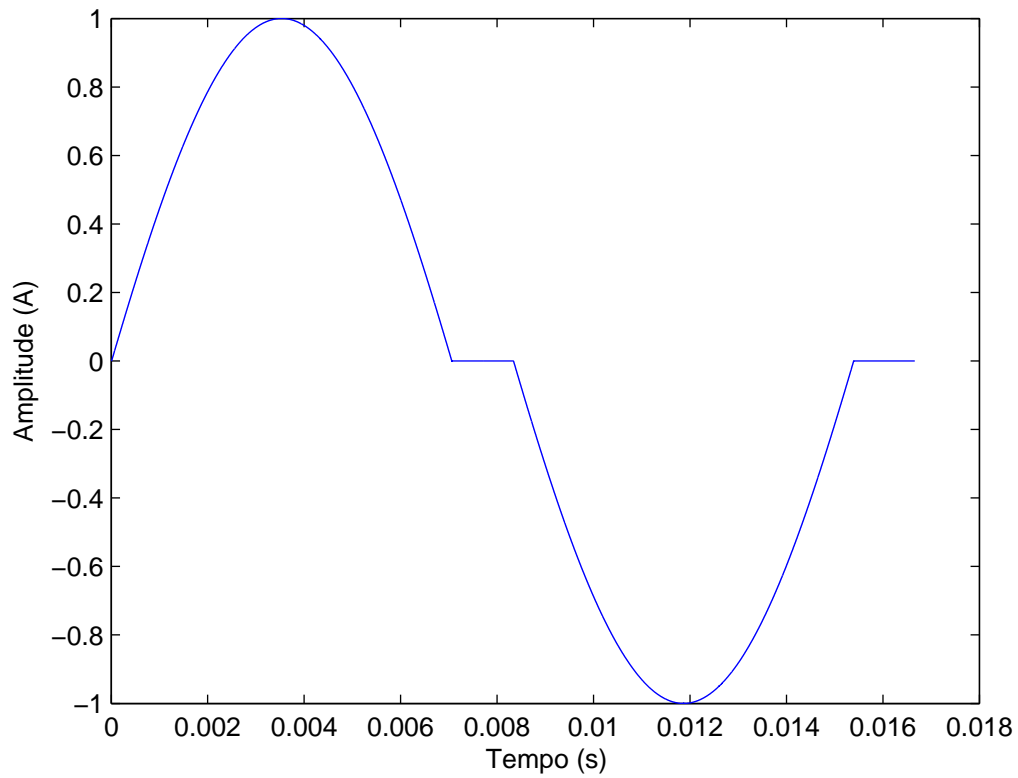


Figura 16 – Simulação 2 - Cenário 1: Corrente de falta

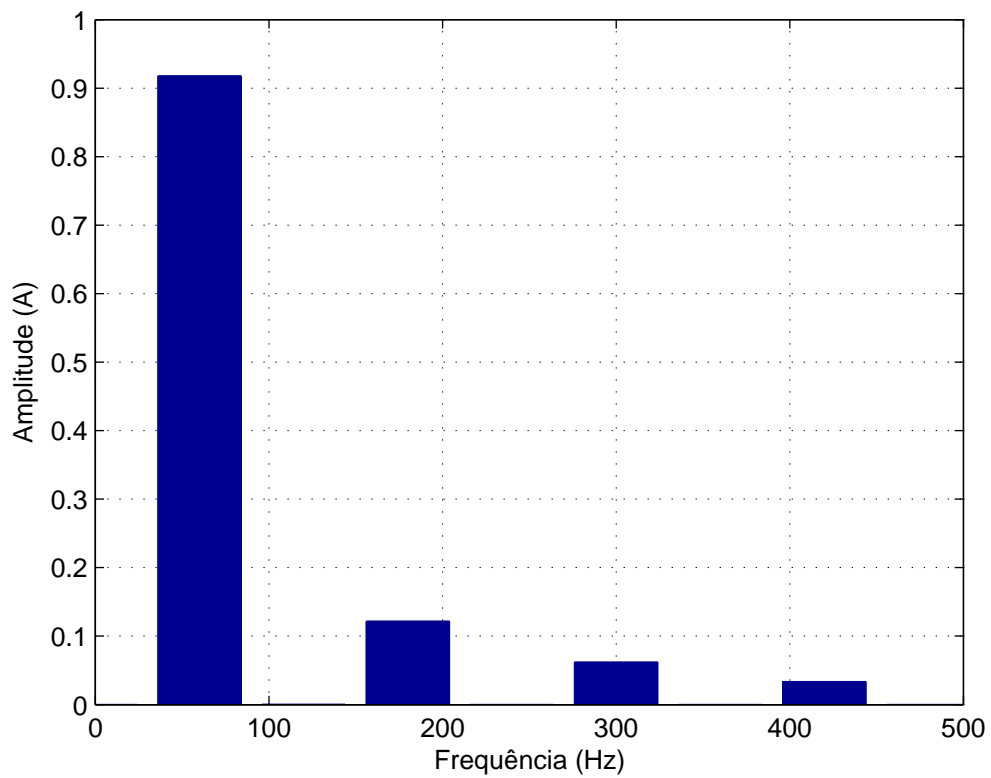


Figura 17 – Simulação 2 - Cenário 1: Espectro Harmônico

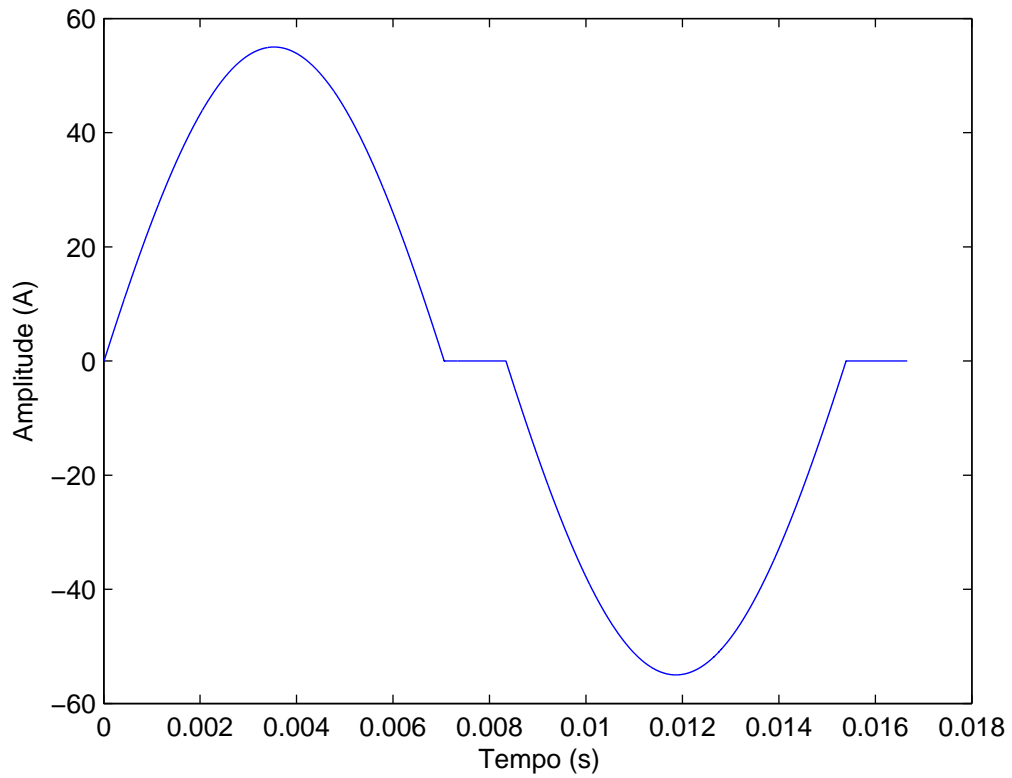


Figura 18 – Simulação 2 - Cenário 12: Corrente de falta

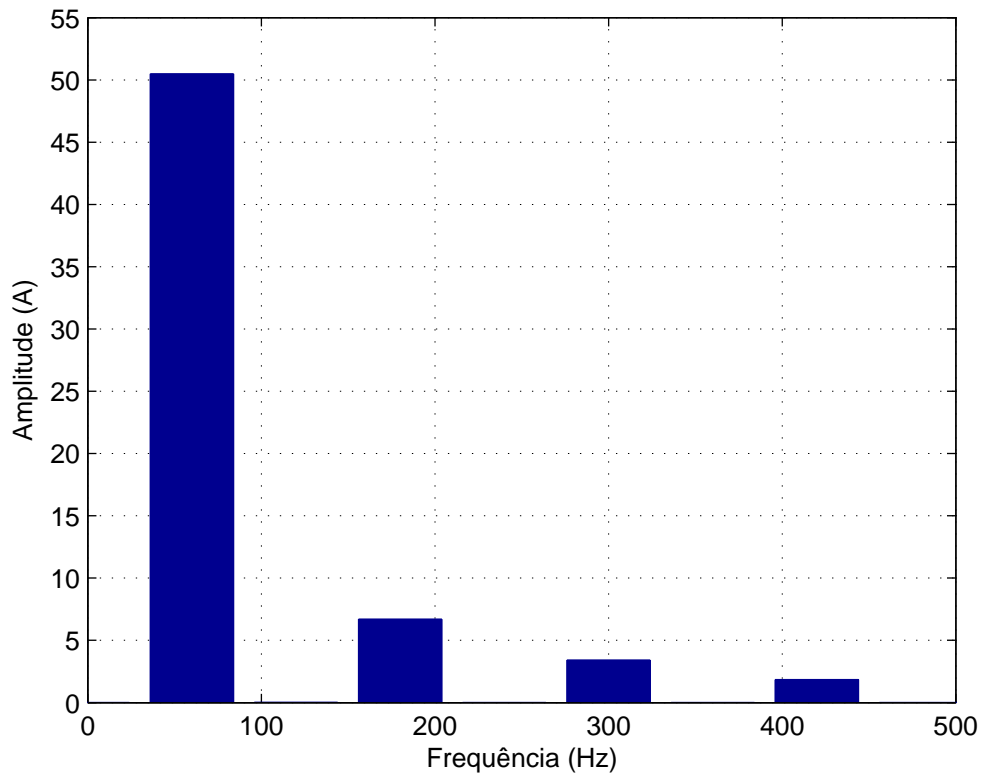


Figura 19 – Simulação 2 - Cenário 12: Espectro Harmônico

Comparando os dois cenários, percebe-se que não há diferenças relevantes além dos valores das amplitudes. Isso ocorre pois o valor das fontes CC está fixo e as resistências influenciam apenas na magnitude da corrente. Como a tensão de ignição do arco é cerca de quatro vezes menor do que a tensão do gerador  $G_s$ , a corrente não fica tão distorcida e as amplitudes das frequências não fundamentais são bem inferiores à amplitude do primeiro harmônico.

As figuras 20 e 21 permitem uma análise do comportamento dos harmônicos com a variação de  $R_3$ . Novamente foi utilizada a escala logarítmica no eixo vertical, permitindo uma melhor visualização das curvas.

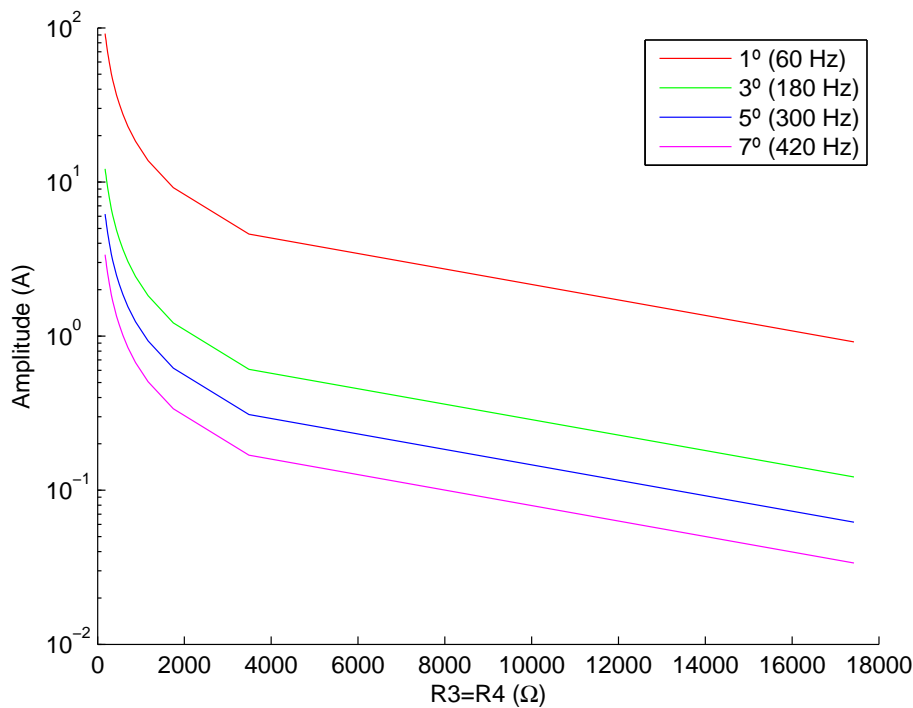


Figura 20 – Simulação 2 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a variação da resistência de falta

A Figura 20 mostra que as amplitudes das componentes fundamental e dos harmônicos diminuem com o aumento de  $R_3$ . Isso era esperado, já que com resistências maiores nos ramos do modelo, a corrente de falta terá menor amplitude. Assim como na Simulação 1, a Figura 21 mostra que as amplitudes dos harmônicos pares tendem a zero, uma vez que não há assimetria entre os semiciclos.

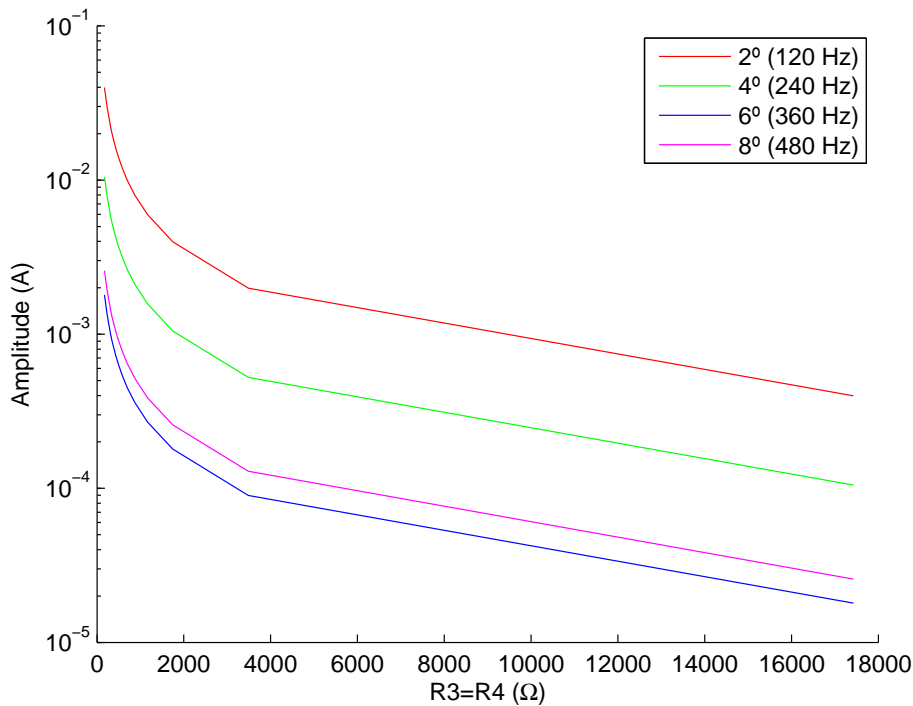


Figura 21 – Simulação 2 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a variação da resistência de falta

#### 4.4.3 Simulação 3 - Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores diferentes nos ramos)

Assim como na Simulação 1, foi fixado  $R_3 = R_4 = 300 \Omega$  e, para gerar assimetria entre os semiciclos, foi fixado  $G_2 = -5472 V$  e o valor de  $G_1$  foi variado de  $1 kV$  a  $20 kV$ , em passos de  $1 kV$ . Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 5.

Para efeitos de comparação, são mostrados os resultados dos cenários 1 e 20, pois um possui uma diferença  $||G_1| - |G_2||$  pequena e outro uma diferença grande:

- Cenário 1:  $||G_1| - |G_2|| = 4472 V$
- Cenário 20:  $||G_1| - |G_2|| = 14528 V$

O cenário 1 é representado pelas figuras 22 e 23, que mostram a corrente de falta e o espectro harmônico, respectivamente.

O cenário 20 é representado pelas figuras 24 e 25, que mostram a corrente de falta e o espectro harmônico, respectivamente.

Analisando os dois casos, percebe-se que a assimetria dos semiciclos causa o aparecimento de harmônicos pares, inclusive de componente CC (o valor médio da corrente não é zero). Assim como nas simulações 1 e 2, quando o valor da tensão de ignição do arco é maior (cenário 20) a amplitude das frequências harmônicas fica maior proporcionalmente à fundamental (há maior distorção).

Tabela 5 – Simulação 3: Parâmetros utilizados

Cenário	$G_1$ (V)	$G_2$ (V)
1	1000	-5472
2	2000	-5472
3	3000	-5472
4	4000	-5472
5	5000	-5472
6	6000	-5472
7	7000	-5472
8	8000	-5472
9	9000	-5472
10	10000	-5472
11	11000	-5472
12	12000	-5472
13	13000	-5472
14	14000	-5472
15	15000	-5472
16	16000	-5472
17	17000	-5472
18	18000	-5472
19	19000	-5472
20	20000	-5472

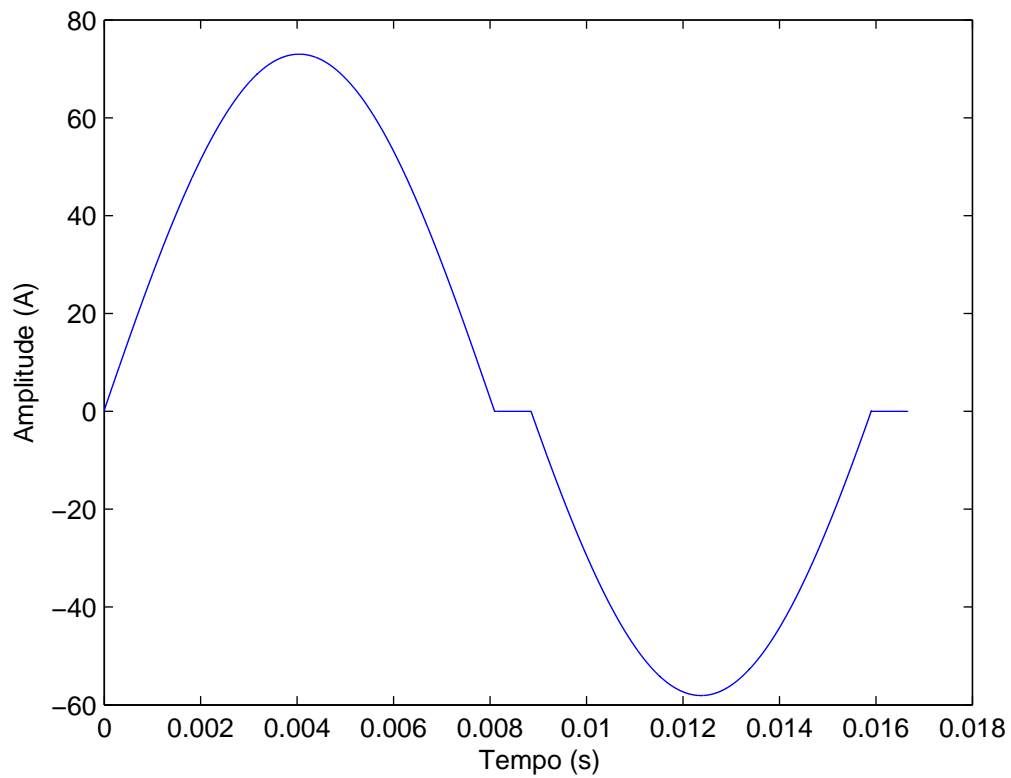


Figura 22 – Simulação 3 - Cenário 1: Corrente de falta

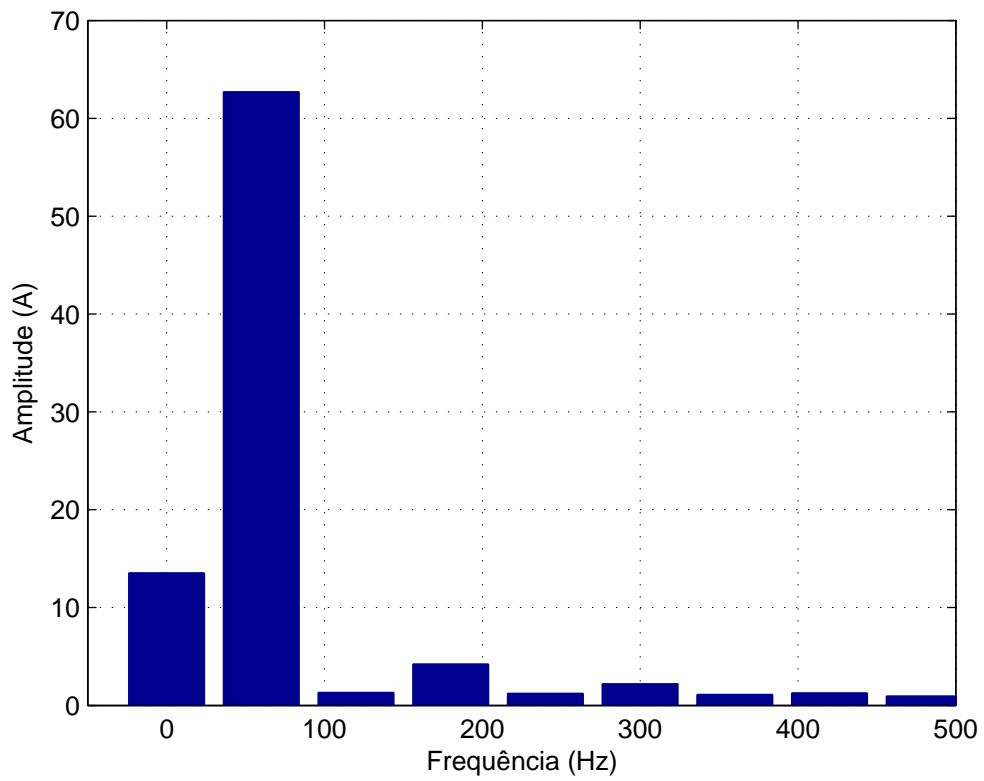


Figura 23 – Simulação 3 - Cenário 1: Espectro Harmônico

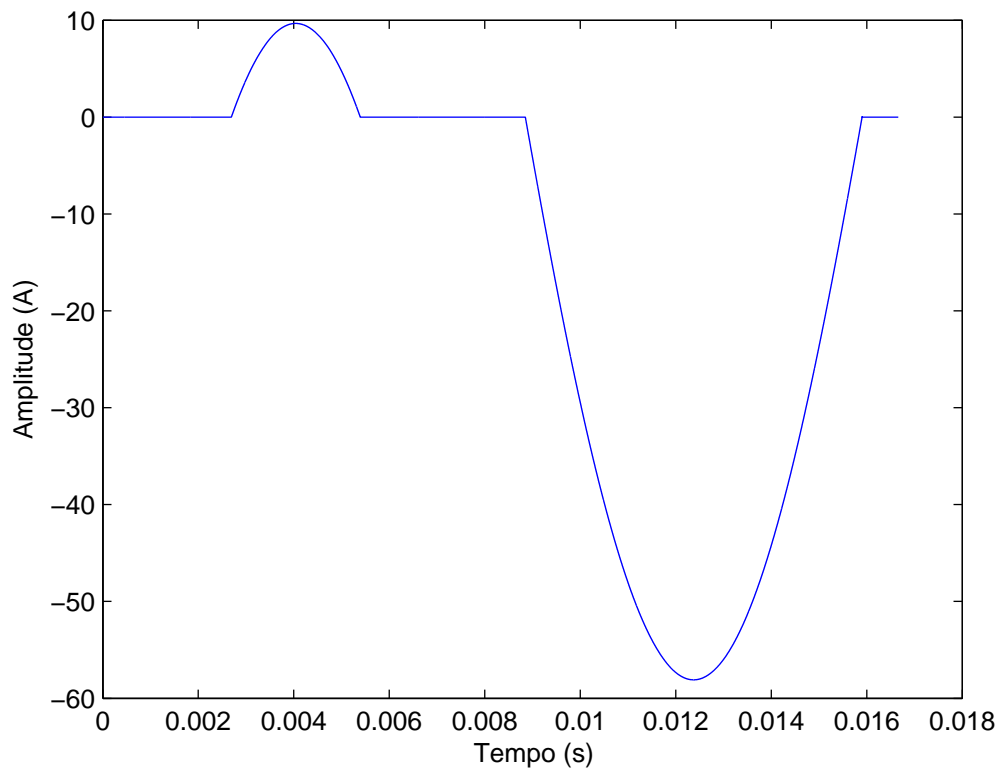


Figura 24 – Simulação 3 - Cenário 20: Corrente de falta

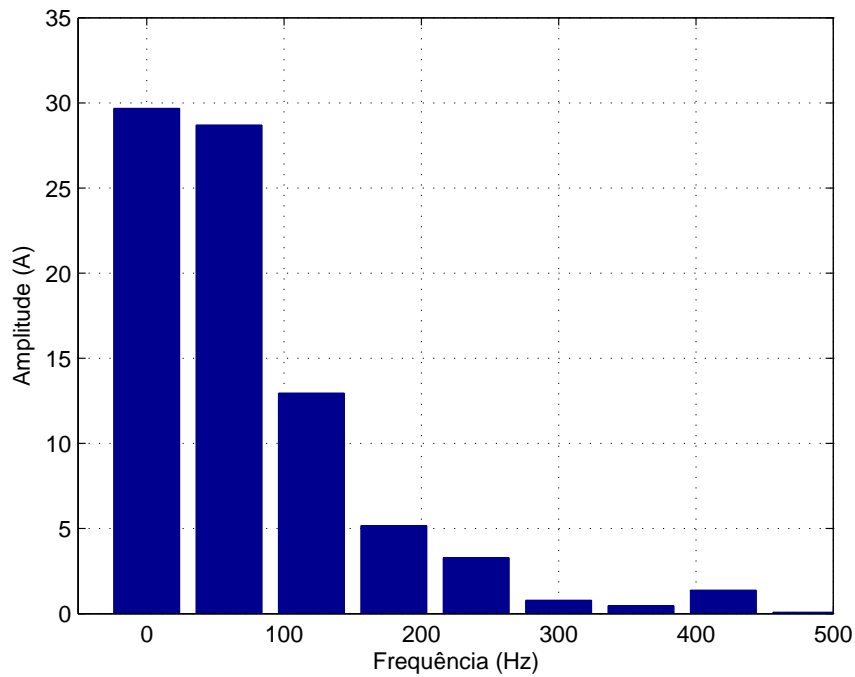


Figura 25 – Simulação 3 - Cenário 20: Espectro Harmônico

As figuras 26 e 27 mostram o comportamento dos harmônicos de acordo com a diferença entre  $G_1$  e  $G_2$ . Não é possível identificar um padrão bem definido para a faixa de valores analisada.

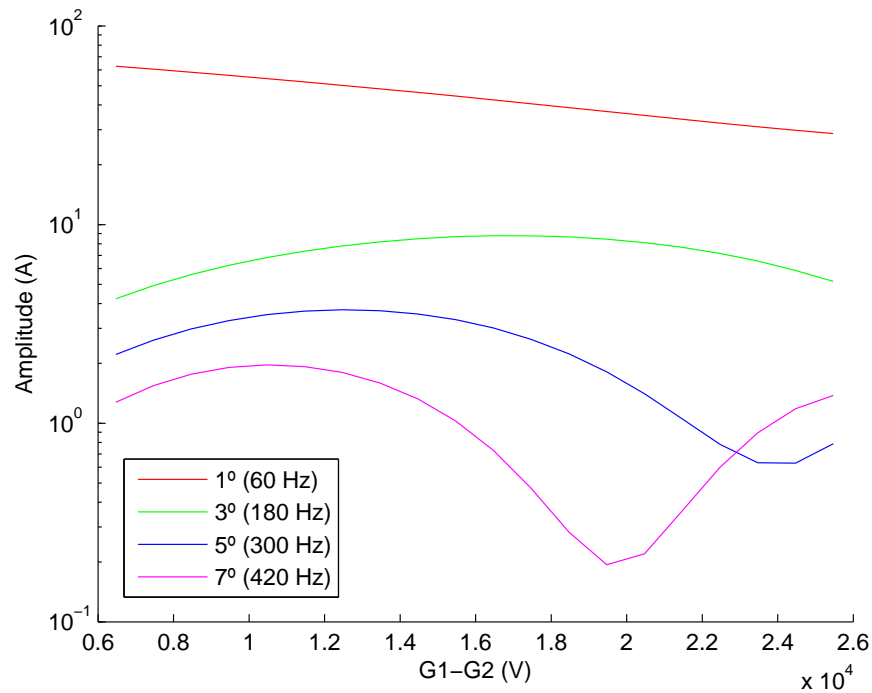


Figura 26 – Simulação 3 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a diferença entre as tensões de ignição de arco



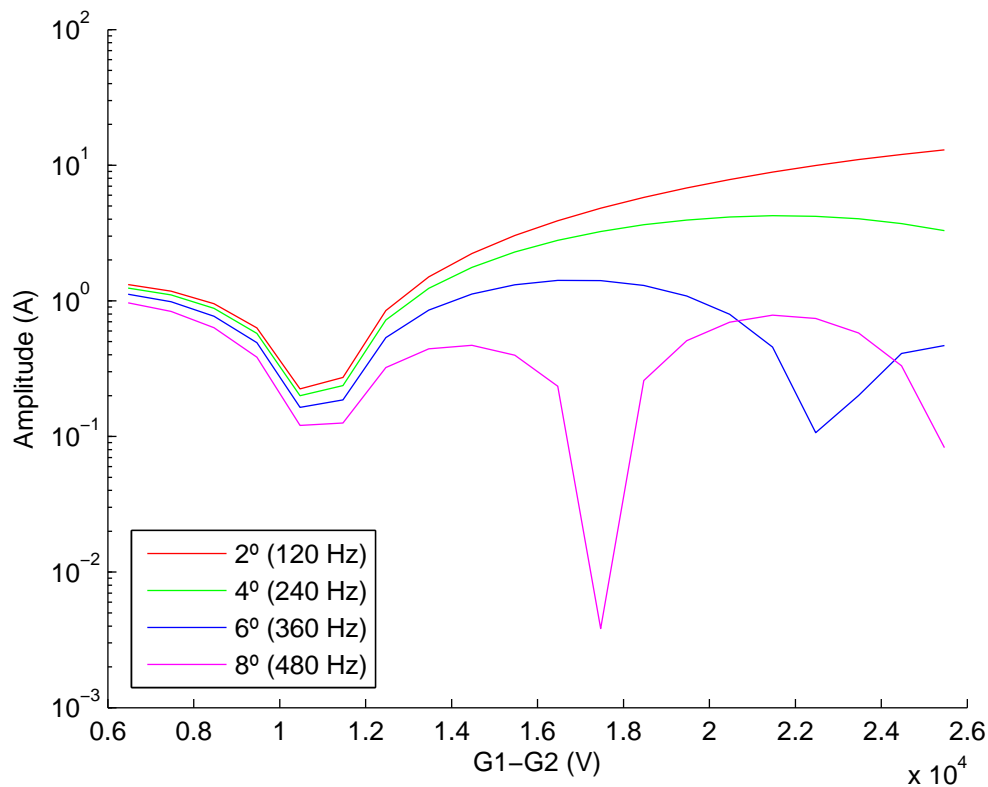


Figura 27 – Simulação 3 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a diferença entre as tensões de ignição de arco

#### 4.4.4 Simulação 4 - Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores diferentes nos ramos)

Para esta simulação, foi fixado  $G_1 = -G_2 = 5472 \text{ V}$  (Figura 8) e, para gerar assimetria entre os semiciclos, foi fixado  $R_4 = 300 \Omega$  e o valor de  $R_3$  foi variado de 100 a 2000  $\Omega$ , em passos de 100  $\Omega$ . Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 6.

Assim como na Simulação 3, são mostrados os cenários 1 e 20 para efeitos de comparação. As correntes de falta e espectros harmônicos são mostrados nas figuras 28, 29, 30 e 31.

Tabela 6 – Simulação 4: Parâmetros utilizados

Cenário	$R_3$ ( $\Omega$ )	$R_4$ ( $\Omega$ )
1	100	300
2	200	300
3	300	300
4	400	300
5	500	300
6	600	300
7	700	300
8	800	300
9	900	300
10	1000	300
11	1100	300
12	1200	300
13	1300	300
14	1400	300
15	1500	300
16	1600	300
17	1700	300
18	1800	300
19	1900	300
20	2000	300

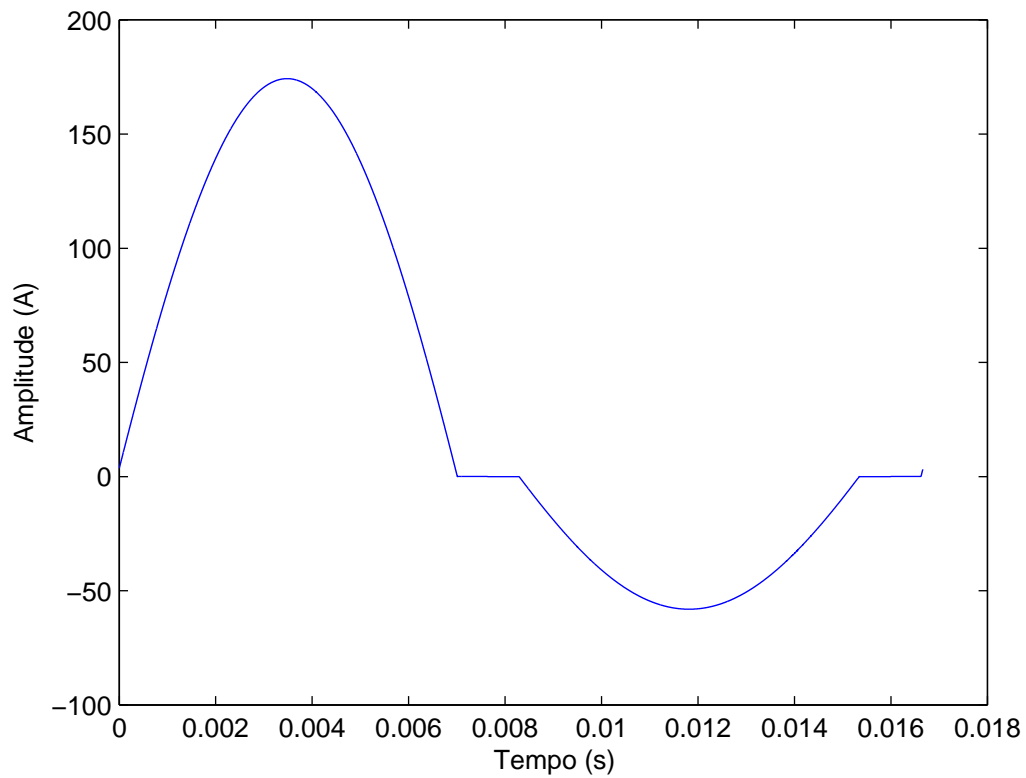


Figura 28 – Simulação 4 - Cenário 1: Corrente de falta

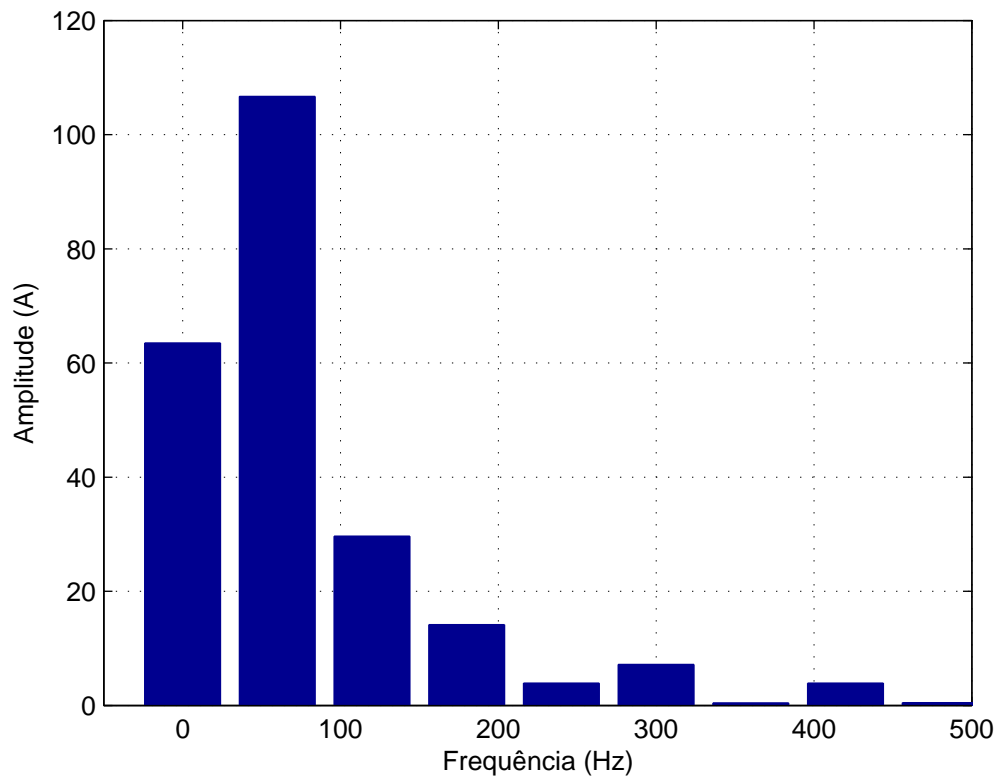


Figura 29 – Simulação 4 - Cenário 1: Espectro Harmônico

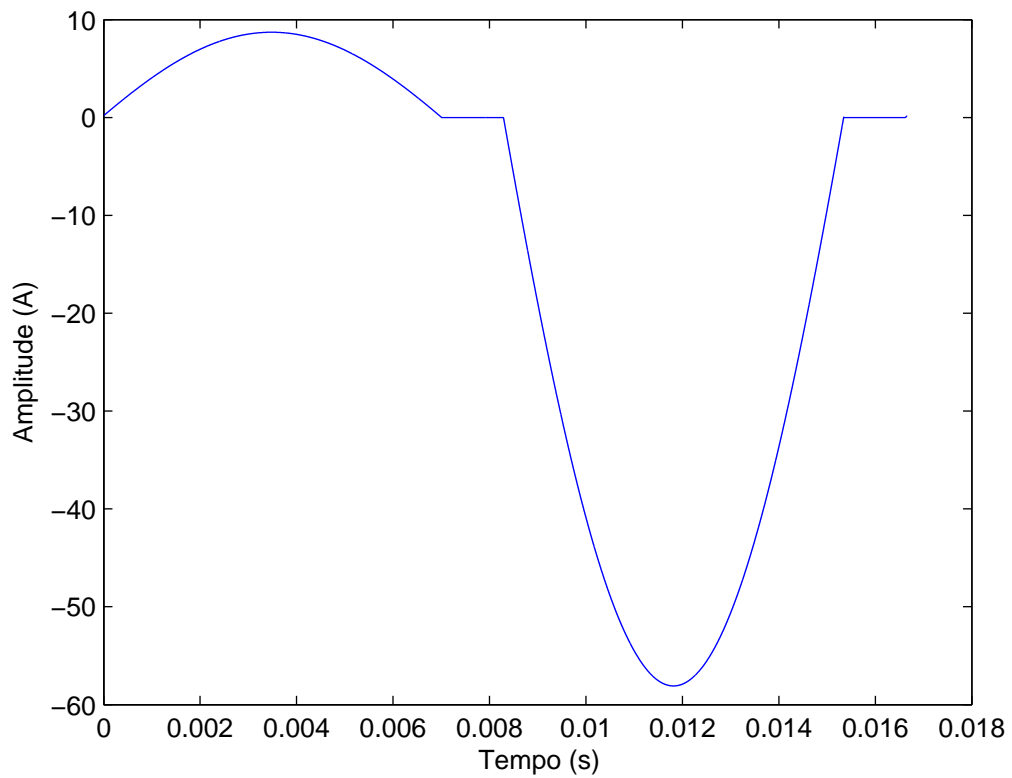


Figura 30 – Simulação 4 - Cenário 20: Corrente de falta

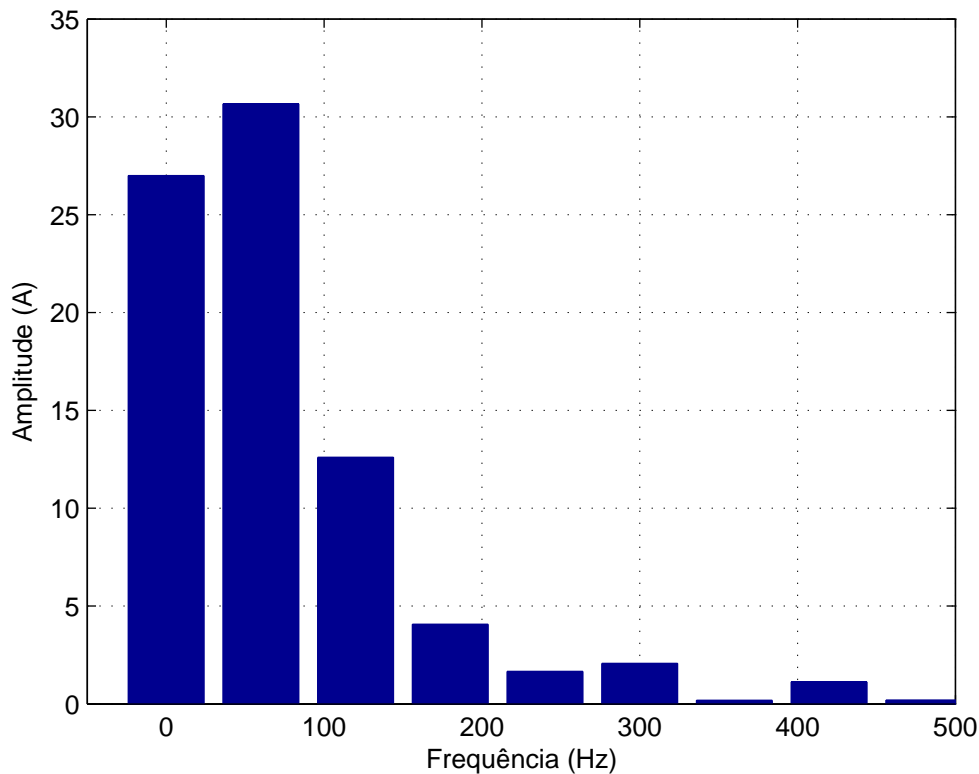


Figura 31 – Simulação 4 - Cenário 20: Espectro Harmônico

Assim como na Simulação 3, percebe-se que quanto maior a assimetria entre os semiciclos, maiores são as amplitudes dos harmônicos pares. Como a diferença de tensão entre o gerador e as fontes CC é grande ( $22,9 \text{ kV} - 5,472 \text{ kV}$ ), a faixa de condução dos diodos é grande, logo a forma de onda da corrente é pouco distorcida. Assim, as amplitudes dos harmônicos ímpares não foram grandes em relação à componente fundamental.

As figuras 32 e 33 permitem uma análise do comportamento dos harmônicos de acordo com a diferença entre  $R_3$  e  $R_4$ . Como já dito anteriormente, as resistências influenciam apenas nas amplitudes dos harmônicos, portanto todas as componentes ímpares possuem comportamentos iguais: a amplitude diminui com o aumento da diferença entre as resistências. Já em relação às componentes pares, quanto maior é a assimetria entre os semiciclos, maiores são suas amplitudes.

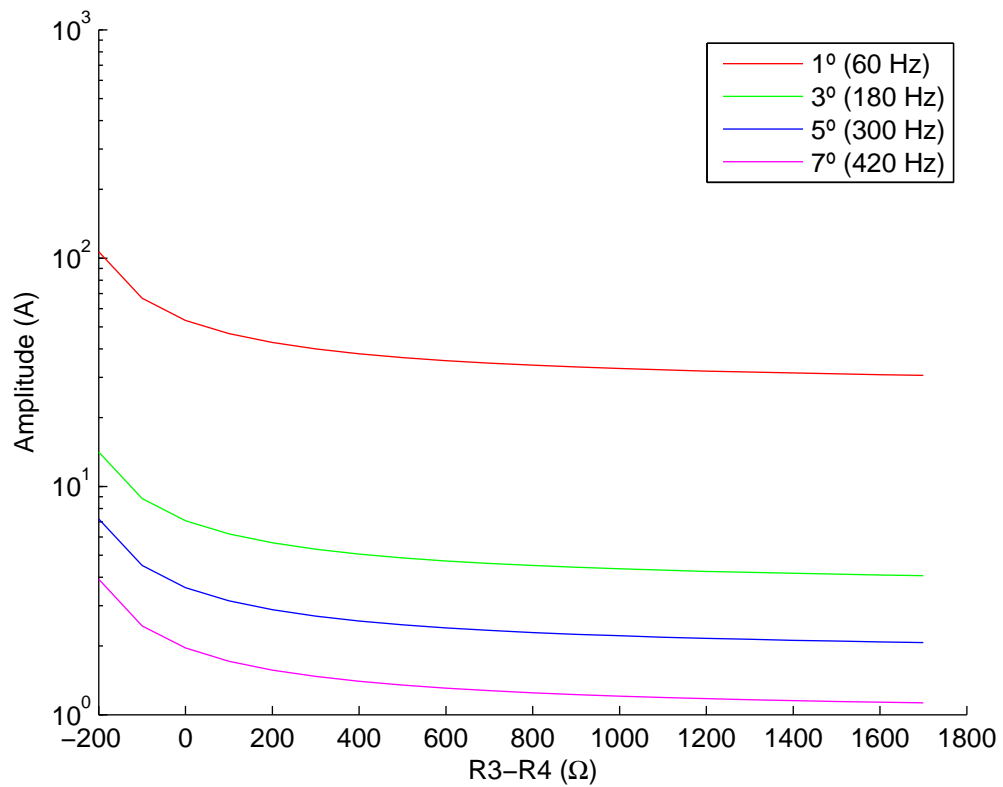


Figura 32 – Simulação 4 - Comportamento dos harmônicos ímpares de acordo com a diferença entre as resistências de falta

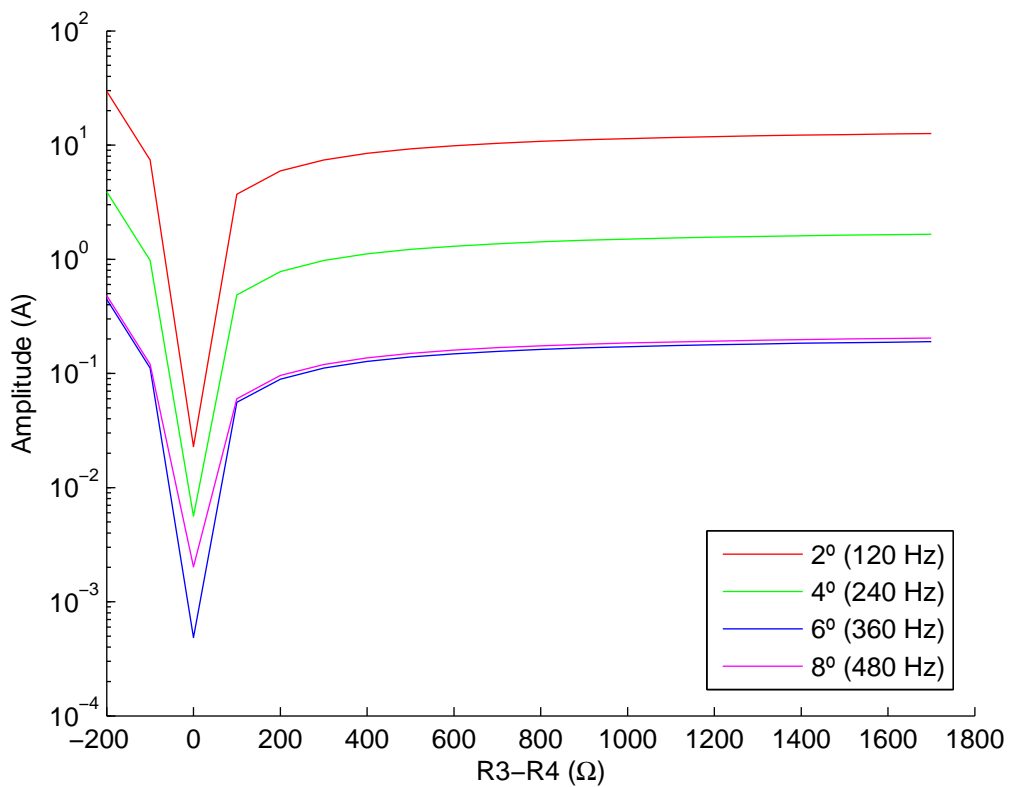


Figura 33 – Simulação 4 - Comportamento dos harmônicos pares de acordo com a diferença entre as resistências de falta

## 4.5 Considerações finais sobre o capítulo

Pela análise das quatro simulações apresentadas, percebe-se que a variação das resistências dos ramos do modelo leva a um comportamento bem definido dos harmônicos: quanto maior a diferença entre os ramos, maior é a assimetria gerada entre os semiciclos, portanto maior é a amplitude dos harmônicos pares. Já quando  $R_3 = R_4$ , percebe-se que quanto maior o valor das resistências, menor é a amplitude de todos os harmônicos (pares e ímpares).

Já a variação das fontes CC não apresentou um comportamento muito bem definido, tornando difícil afirmar qual sua influência para o espectro harmônico. Não fica claro, portanto, se o espectro harmônico pode ser um bom indicador da ocorrência de uma FAI. As próximas simulações têm o objetivo de observar se o comportamento se repete.

---

# Análise de distúrbios no sistema de 34 barras do IEEE

Já conhecendo o comportamento do modelo em uso, a próxima etapa consiste em simular a aplicação de Faltas de Alta Impedância em diferentes pontos de um sistema de distribuição e, a partir de medições feitas na subestação, estudar os distúrbios causados. A análise desses distúrbios pode revelar quais parâmetros são mais interessantes para a detecção dessas faltas.

Para realizar as simulações, foi escolhido o sistema de 34 barras do IEEE (localizado no Arizona - Estados Unidos) (IEEE, 2013) pois conta com um tamanho suficientemente grande para que as distâncias sejam consideradas nos resultados (última barra está cerca de 60km distante da subestação). Assim como no estudo do modelo (Capítulo 4), as simulações desta análise foram feitas no *software* ATP DRAW e, seus resultados, trabalhados no *software* MATLAB.

## 5.1 Sistema de 34 barras do IEEE

O Sistema IEEE 34 barras opera a 24,9 kV e apresenta cargas desbalanceadas, presença de dois reguladores de tensão e também de um transformador num ramo de 4,16 kV, além de duas ramificações com carga capacitiva. O diagrama unifilar do sistema é mostrado na Figura 34.

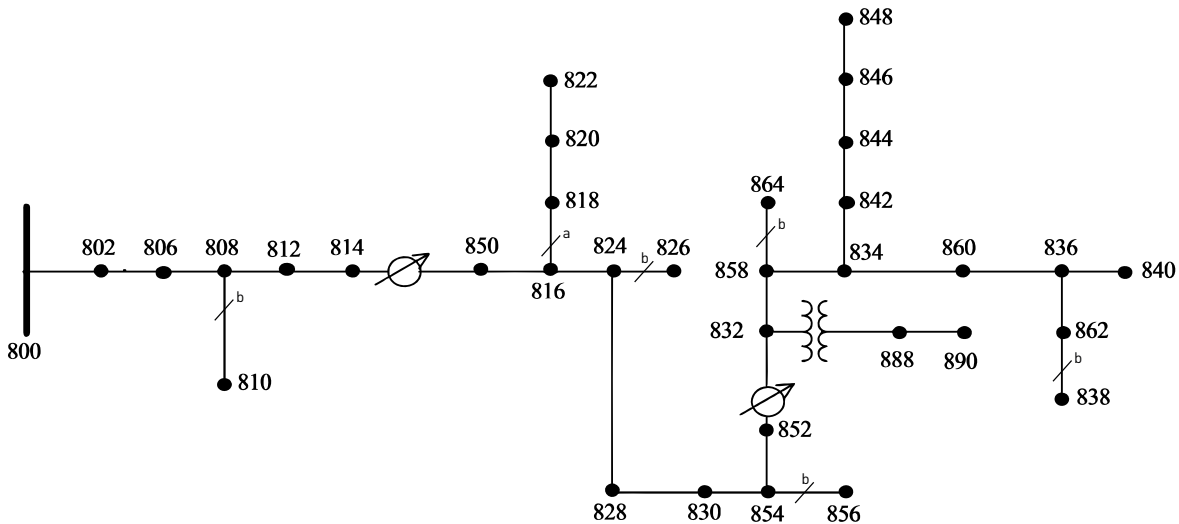


Figura 34 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 34 Barras. *Adaptado de:* (IEEE, 2013)

## 5.2 Estrutura do estudo

Para facilitar a estruturação das simulações, o sistema foi dividido em 9 zonas, como mostrado na Figura 35.

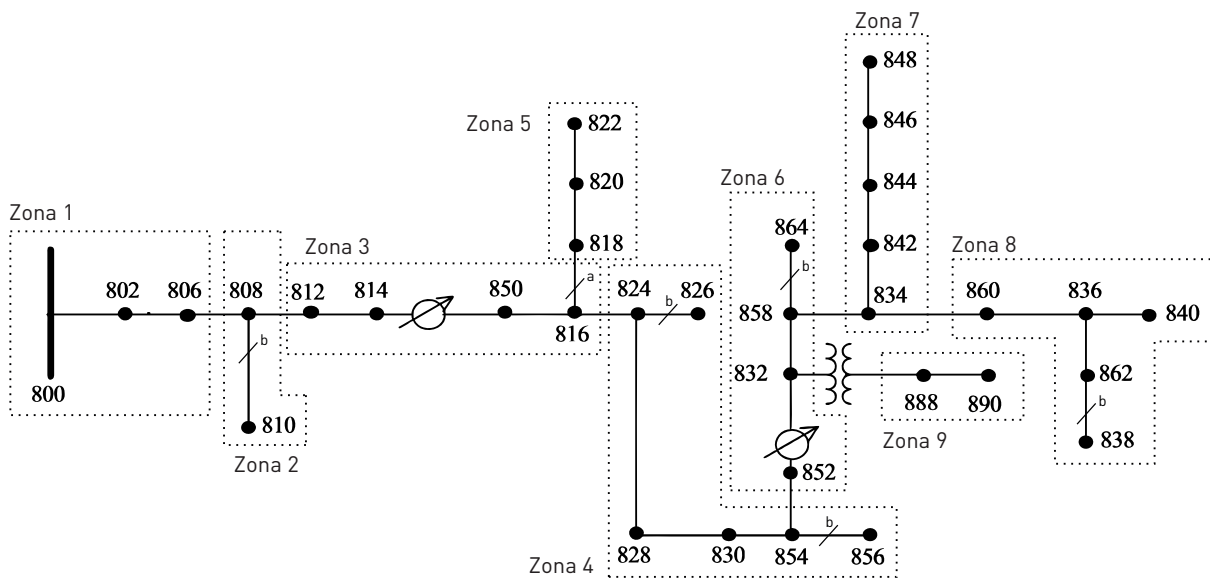


Figura 35 – Sistema IEEE 34 Barras, separado por zonas. *Adaptado de:* (IEEE, 2013)

Como mencionado no Capítulo 2, uma FAI pode ocorrer por contato direto do cabo com o solo ou por contato indireto (por exemplo uma árvore tocando o cabo). Este trabalho visa estudar os distúrbios causados na corrente da subestação quando há uma FAI por contato direto. No entanto, será apresentada também uma breve análise de distúrbios causados por FAI de contato indireto, ficando como uma possível continuação deste trabalho.

As simulações foram, portanto, divididas em duas partes principais:



- **Falta com Contato Direto**

O contato direto ocorre quando o condutor se rompe e toca o solo. A Figura 36 mostra a chave 1 sendo utilizada para isolar parte do sistema em uma das fases, simulando o rompimento do cabo. Após o tempo de queda (1,28s - vide Subseção 2.1.1), a chave 2 é fechada para ligar o modelo elétrico da falta no sistema.

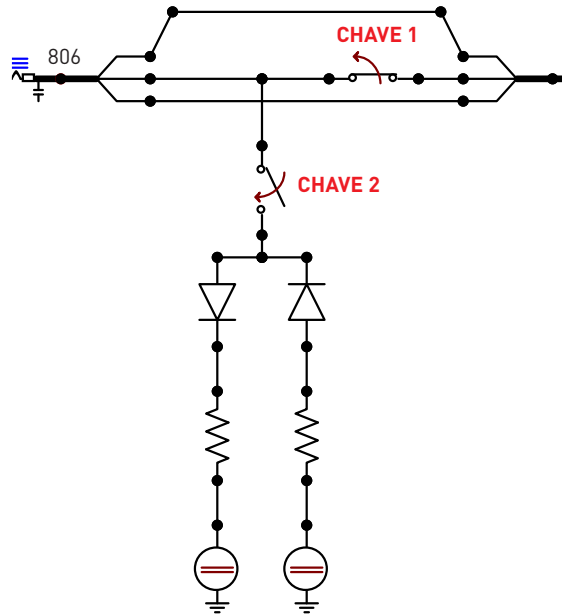


Figura 36 – FAI aplicada por meio de simulação no *software* ATP DRAW.

- **Falta com Contato Indireto**

No contato indireto, uma superfície encosta no condutor sem que haja rompimento deste. Assim, a simulação se resume em ligar o modelo elétrico da falta no sistema, sem que uma parte deste seja isolada.

Assim como no Capítulo 4, as simulações foram feitas para quatro situações. As situações e os parâmetros utilizados são mostrados a seguir. Os parâmetros foram adotados com base nos dados da literatura da Figura 8.  $R_1$  representa a resistência do ramo positivo (esquerdo), enquanto  $R_2$  a resistência do ramo negativo (direito).

1. **Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores iguais nos ramos)**

Para esta situação, as resistências do modelo foram adotadas como  $R_1 = R_2 = 200 \Omega$  e os valores utilizados para as fontes CC são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Situação 1: Parâmetros Utilizados

Cenário	$V_p$ (V)	$V_n$ (V)
1	3847	-3847
2	6155	-6155
3	9358	-9358
4	12000	-12000

## 2. Resistências fixas, fontes CC variáveis (valores diferentes nos ramos)

Assim como na Situação 1, foi adotado  $R_1 = R_2 = 200 \Omega$ . A fonte CC positiva foi fixada com  $V_p = 6180 V$  e, para criar assimetria entre os semiciclos, quatro cenários foram definidos para a fonte CC negativa, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Situação 2: Parâmetros Utilizados

Cenário	$V_n$ (V)
1	-3847
2	-6155
3	-9358
4	-12000

## 3. Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores iguais nos ramos)

Nesta situação, as fontes CC foram fixadas como  $V_p = 6180 V$  e  $V_n = -6180 V$ . Os valores das resistências são mostrados na Tabela 9 e foram escolhidos de forma que as correntes de falta estivessem em uma ampla faixa dentro do que mostra a literatura.

Tabela 9 – Situação 3: Parâmetros Utilizados

Cenário	$R_1 = R_2$ ( $\Omega$ )
1	200
2	577
3	1440

## 4. Fontes CC fixas, resistências variáveis (valores diferentes nos ramos)

Assim como na Situação 3, foi adotado  $V_p = 6180 V$  e  $V_n = -6180 V$ . A resistência do ramo esquerdo foi fixada com  $R_1 = 245 \Omega$  e, para criar assimetria entre os semiciclos, dois cenários foram definidos para a resistência do ramo direito, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Situação 4: Parâmetros Utilizados

Cenário	$R_2$ ( $\Omega$ )
1	577
2	1440

## 5.3 FAI por Contato Direto - Com Perda de Carga

Como mencionado anteriormente, o contato direto ocorre quando há o rompimento do condutor e consequente isolamento de parte do sistema, causando perda de carga. Para analisar os distúrbios causados por uma FAI deste tipo, foram escolhidas 4 zonas do sistema (1, 3, 6 e 8) e as faltas foram aplicadas nas barras 806, 816, 858 e 860, como destacado na Figura 37.

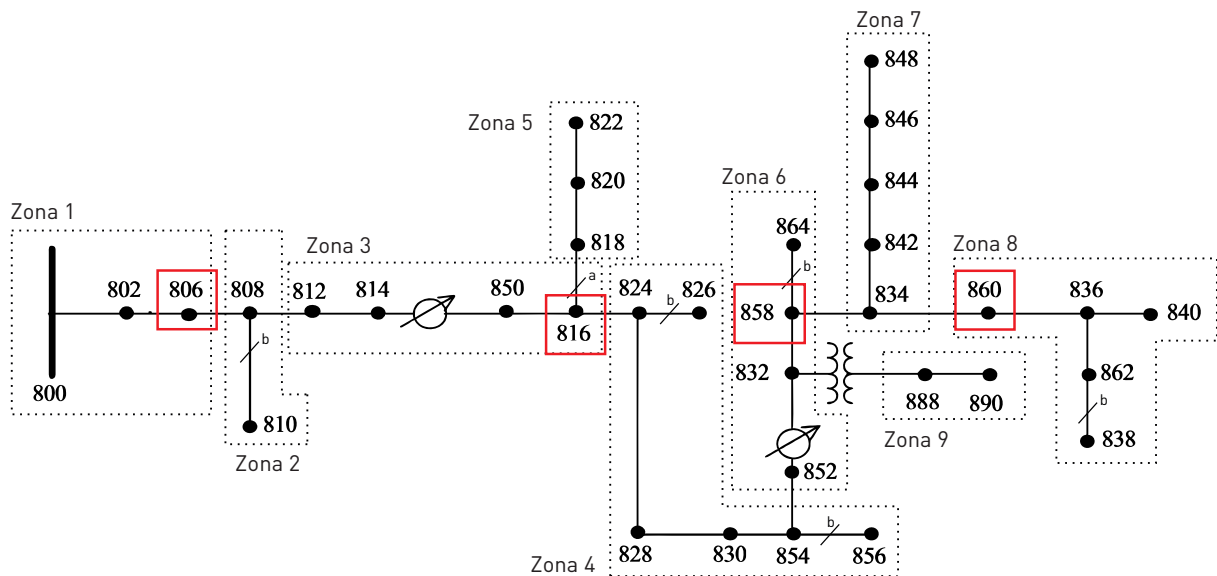


Figura 37 – Sistema IEEE 34 Barras com destaque para as barras utilizadas na simulação de contato direto. *Adaptado de:* (IEEE, 2013)

Como a maioria das ramificações monofásicas refere-se à Fase B, optou-se por analisar os distúrbios nessa fase. Para cada falta aplicada na Fase B, a corrente da subestação foi medida e os dados exportados do ATP DRAW para o MATLAB. Neste, foi aplicada a Transformada Discreta de Fourier na corrente, gerando o espectro harmônico desejado.

As figuras 38 a 42 representam a variação das amplitudes de um harmônico específico ao longo do sistema, ou seja, o eixo horizontal representa a distância do ponto de aplicação da falta até a subestação e o eixo vertical a amplitude do harmônico. Os asteriscos (\*) nas curvas dos gráficos representam os pontos em que as faltas foram aplicadas (quatro barras, logo quatro asteriscos).

Os valores de 12 kV para as fontes CC e de 1440  $\Omega$  para os resistores estão bem diferentes do que apresenta a literatura (Figura 8). Portanto, para efeito de análise, foi escolhido o cenário 2 para as situações 1 e 3, e o cenário 1 para as situações 2 e 4. Foram considerados os cinco primeiros harmônicos, por possuírem amplitudes mais relevantes.

O comportamento dos cinco primeiros harmônicos, de acordo com a distância da subestação, é mostrado nas figuras 38, 39, 40, 41 e 42.

A análise da Figura 38 mostra que, quanto mais longe da subestação a falta é aplicada,

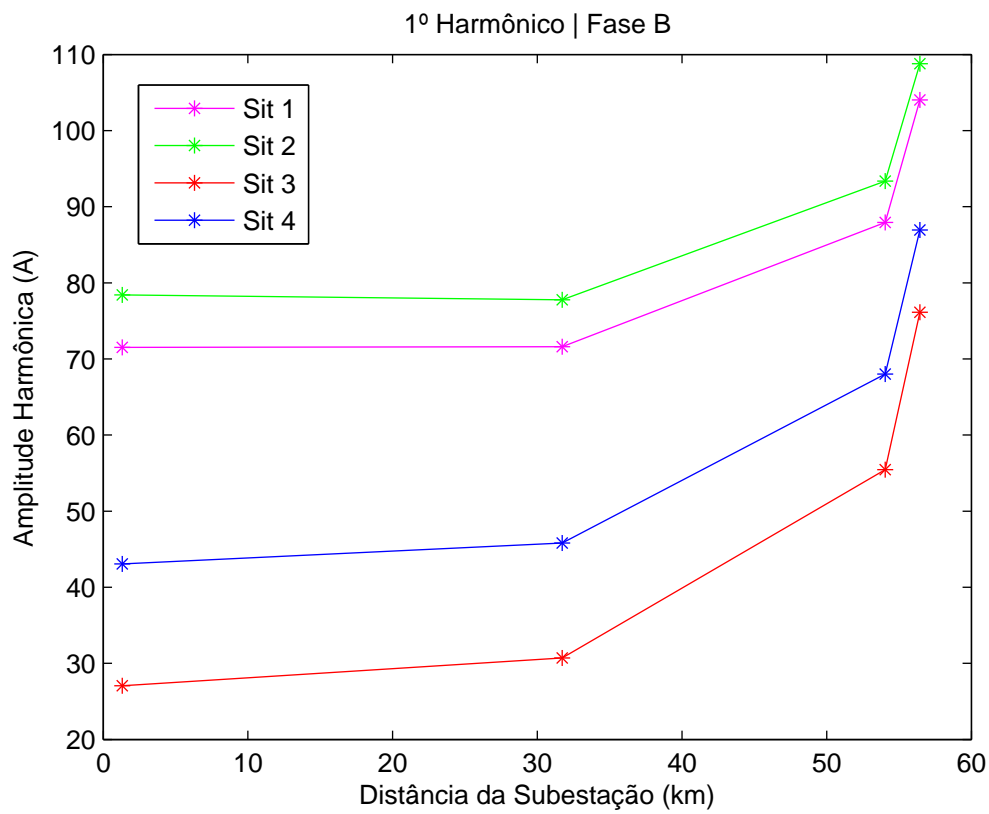


Figura 38 – FAI por Contado Direto - Amplitude do 1º Harmônico × distância da subestação

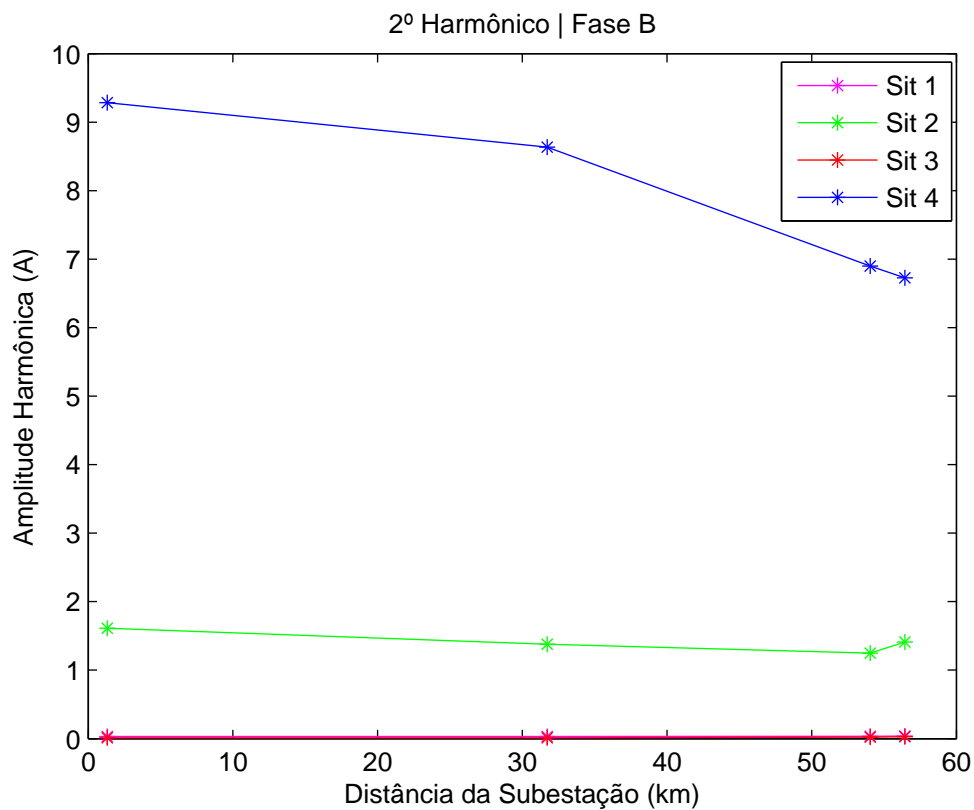


Figura 39 – FAI por Contado Direto - Amplitude do 2º Harmônico × distância da subestação

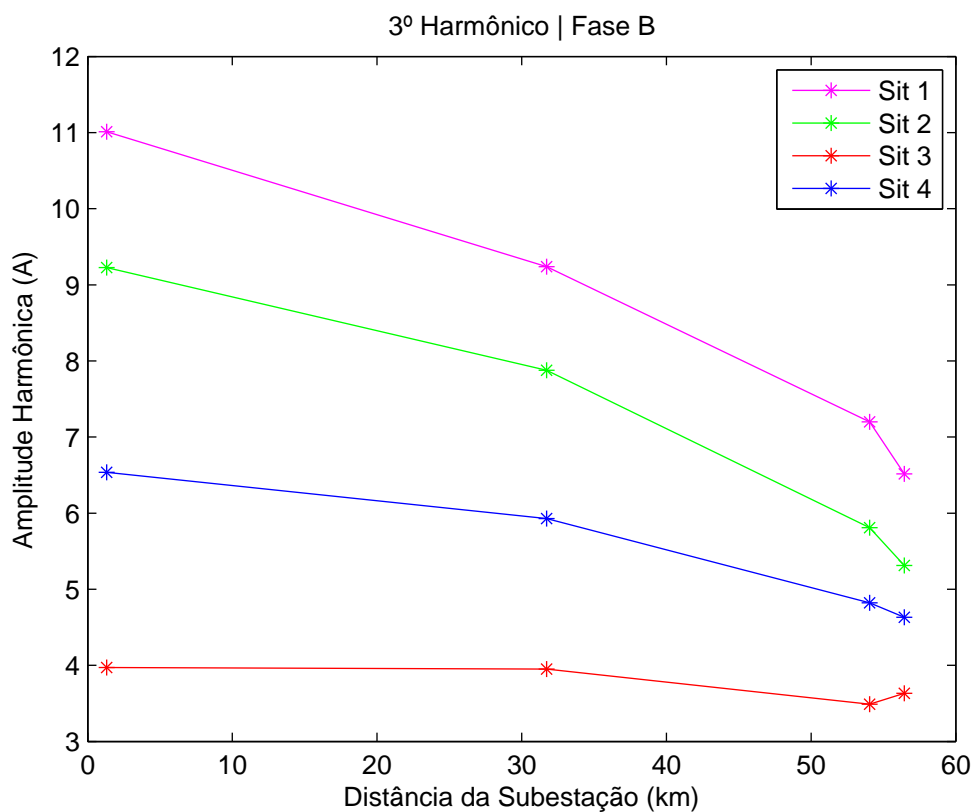


Figura 40 – FAI por Contado Direto - Amplitude do 3º Harmônico × distância da subestação

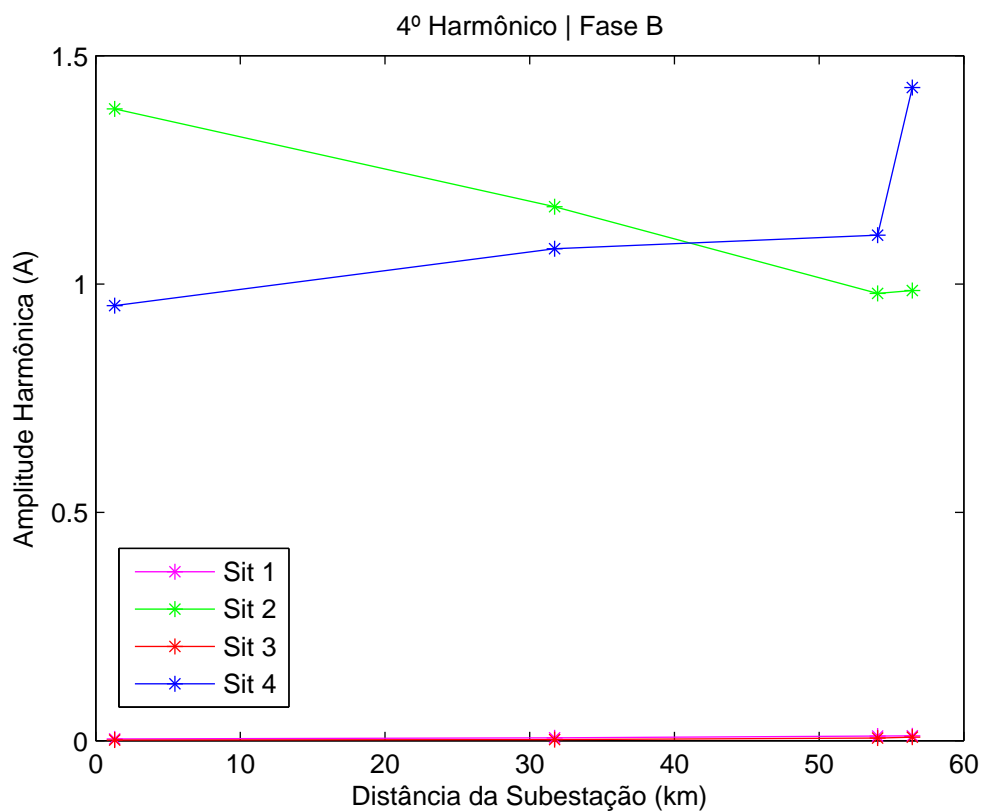


Figura 41 – FAI por Contado Direto - Amplitude do 4º Harmônico × distância da subestação

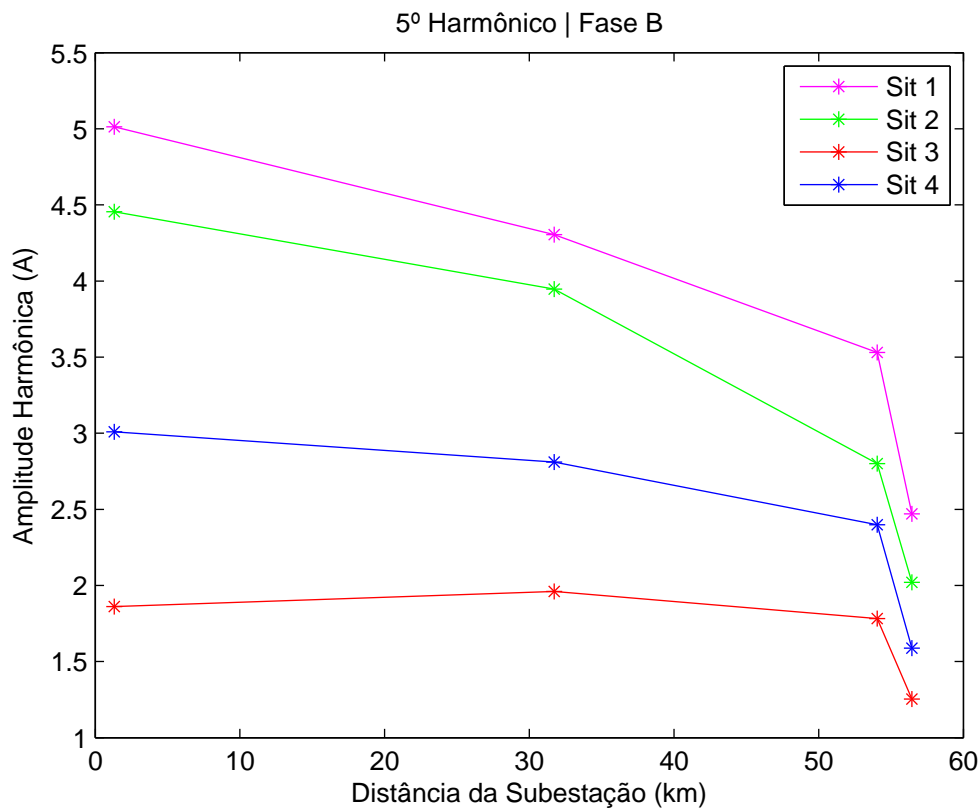


Figura 42 – FAI por Contado Direto - Amplitude do 5º Harmônico  $\times$  distância da subestação

maior é a amplitude da componente fundamental das correntes medidas na subestação. Isso era esperado, uma vez que o rompimento do condutor isola uma parte do sistema: quanto mais perto da subestação, maior é a parcela isolada do sistema; e, quanto menor fica o sistema, menor é a amplitude da corrente drenada pelas cargas.

As figuras 39 e 41 mostram que há presença de harmônicos pares apenas nas situações em que foi criada uma assimetria entre o semiciclo positivo e o negativo (Sit 2 e Sit 4). Já a análise das figuras 40 e 42 mostra um comportamento parecido para o 3º e 5º harmônicos: quanto mais longe da subestação, menor é a influência da falta na corrente medida, portanto as amplitudes desses harmônicos ficam menores.

A Distorção Harmônica Total (DHT) da corrente também foi analisada, como mostrado na Figura 43. Fica evidente que, quanto mais longe da subestação, menor é a contribuição dos harmônicos para a corrente, ou seja, a corrente fica menos distorcida.

Para comprovar as análises, todos os cenários foram testados. Uma outra combinação é mostrada no Apêndice A, que contemplou o cenário 3 para as situações de 1 a 3 e o cenário 2 para a situação 4.

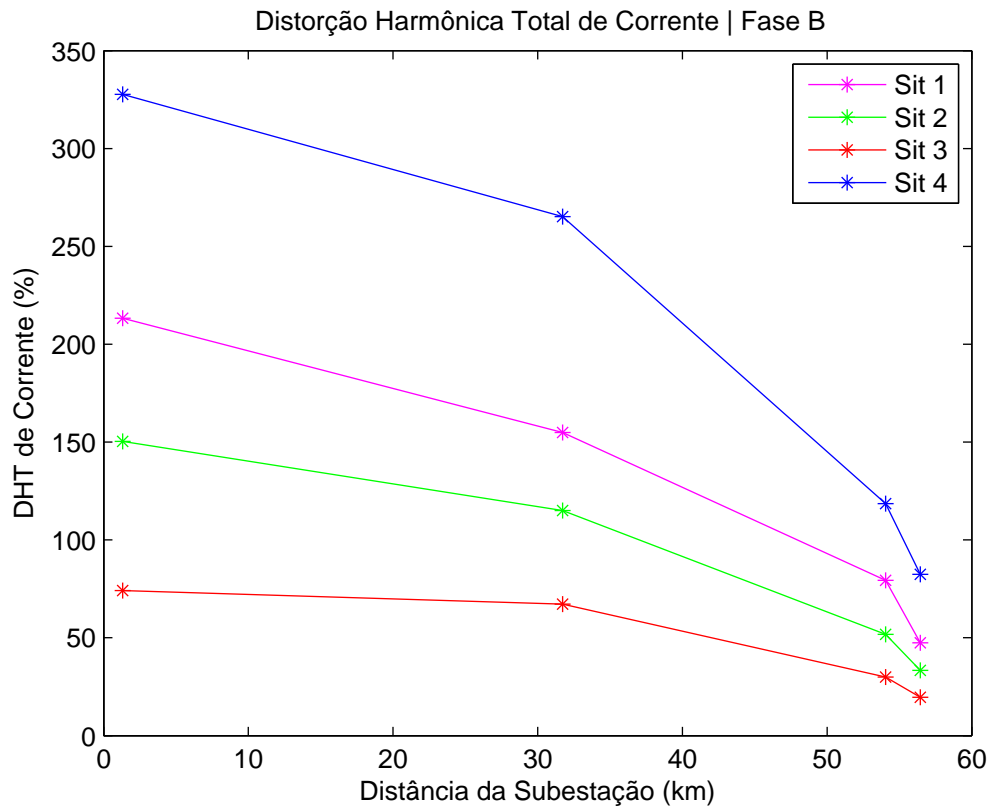


Figura 43 – FAI por Contato Direto - Distorção Harmônica Total (DHT) × distância da subestação

## 5.4 FAI por Contato Indireto - Sem Perda de Carga

O contato indireto aqui considerado ocorre quando algo toca o condutor, sem que este se rompa, portanto não há isolamento de nenhuma parte do sistema (não há perda de carga). Novamente, foram escolhidas 4 zonas do sistema (2, 4, 7 e 8) e as faltas foram aplicadas nas barras 810, 856, 848 e 838, como destacado na Figura 44.

Assim como na simulação de contato direto, foi utilizada a Fase B e o cenário 2 para as situações 1 e 2; para as situações 3 e 4 foi utilizado o cenário 1.

O comportamento dos cinco primeiros harmônicos de acordo com a distância da subestação é mostrado nas figuras 45, 46, 47, 48 e 49.

Como não há perda de carga, os harmônicos tendem a diminuir de amplitude à medida que a falta se afasta da subestação. No entanto, há dois reguladores de tensão no sistema: entre as barras 814 e 850 e entre as barras 852 e 832, como mostrado na Figura 44. Os reguladores elevam a tensão daqueles pontos e, como o modelo de falta utilizado é passivo, a amplitude de falta também é elevada. Isso explica porque as amplitudes dos harmônicos começam em declínio, mas depois da segunda barra começam a aumentar (ou, em alguns casos, diminuem o decréscimo). Esse comportamento também está presente na DHT, mostrada na Figura 50.

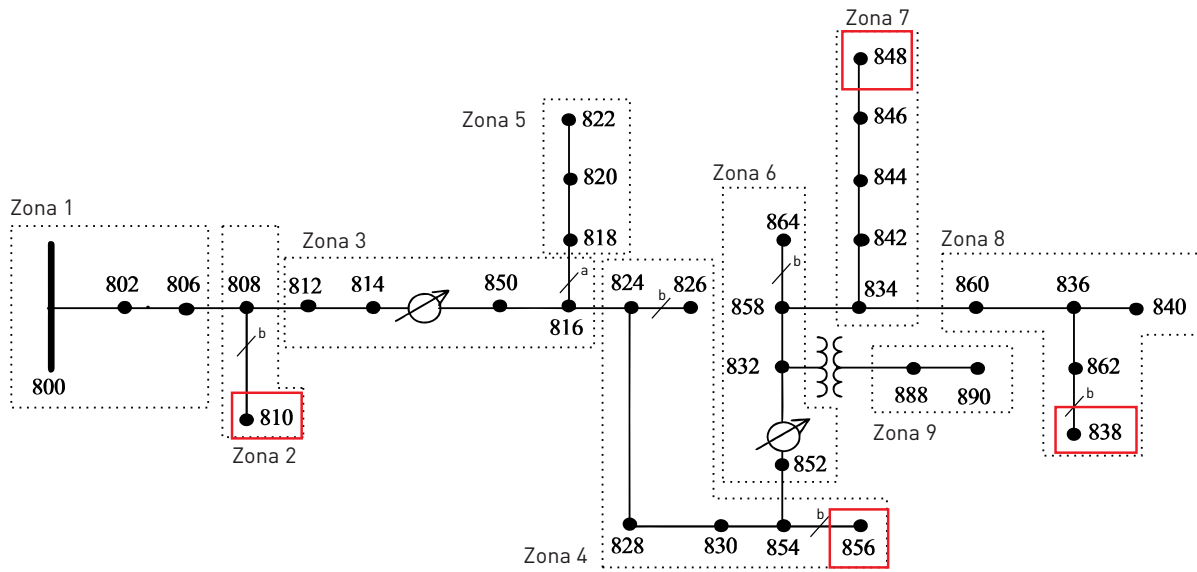


Figura 44 – Sistema IEEE 34 Barras com destaque para as barras utilizadas na simulação de contato indireto. Adaptado de: (IEEE, 2013)

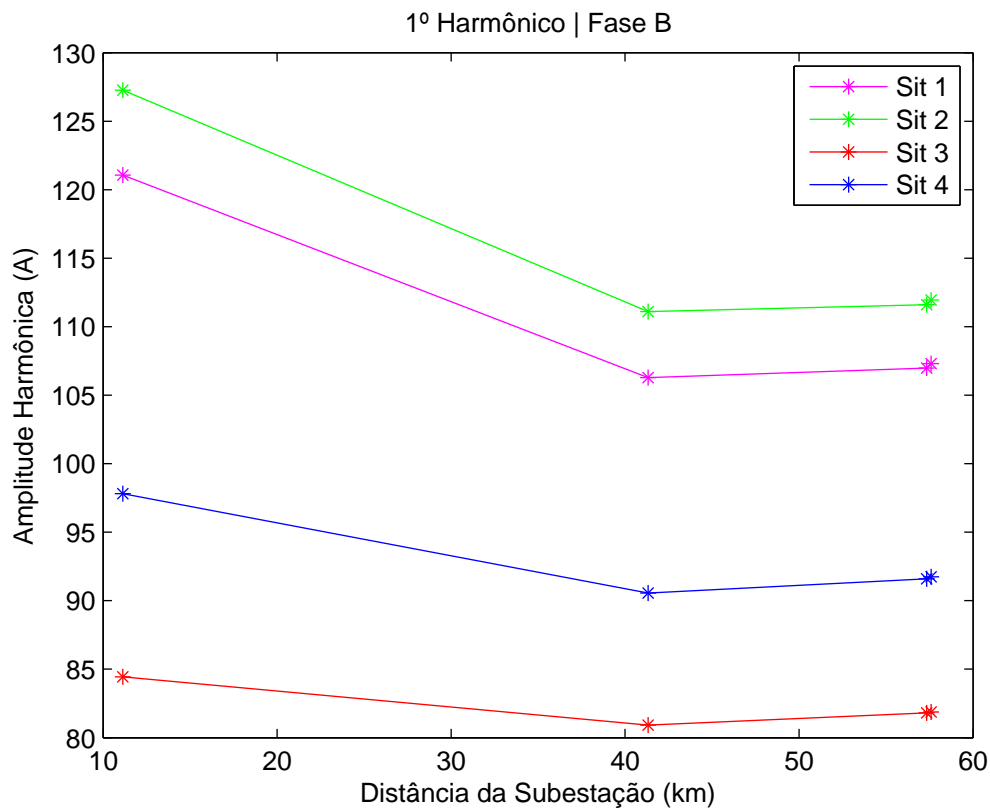


Figura 45 – FAI por Contato Indireto - Amplitude do 1º Harmônico × distância da subestação



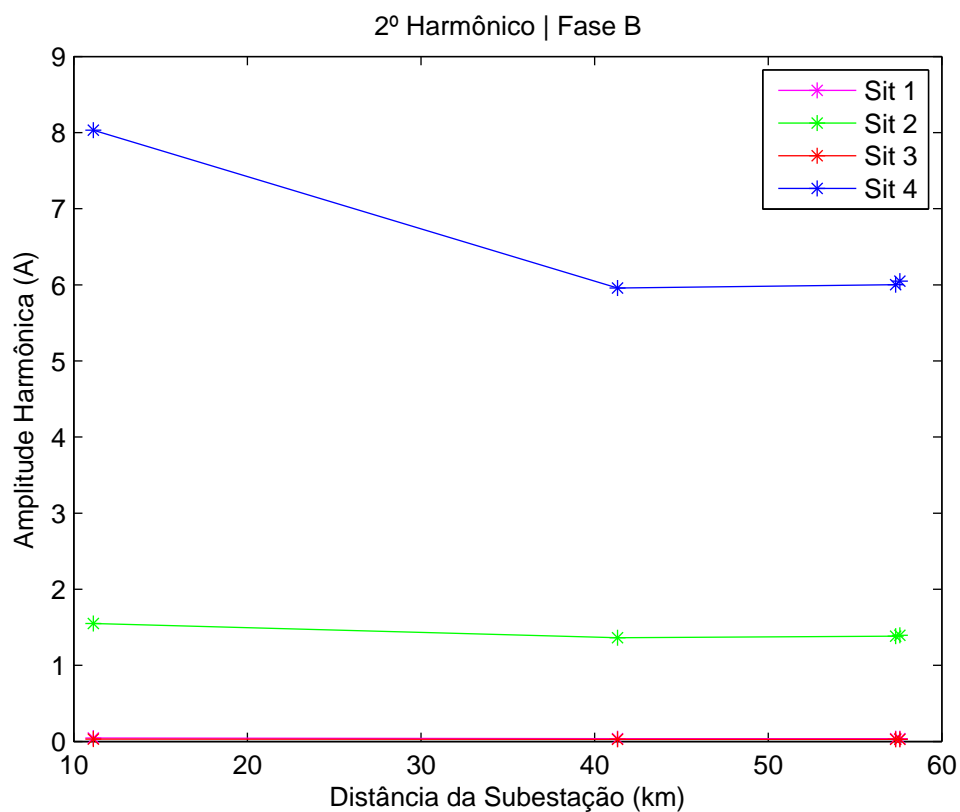


Figura 46 – FAI por Contado Indireto - Amplitude do 2º Harmônico × distância da subestação

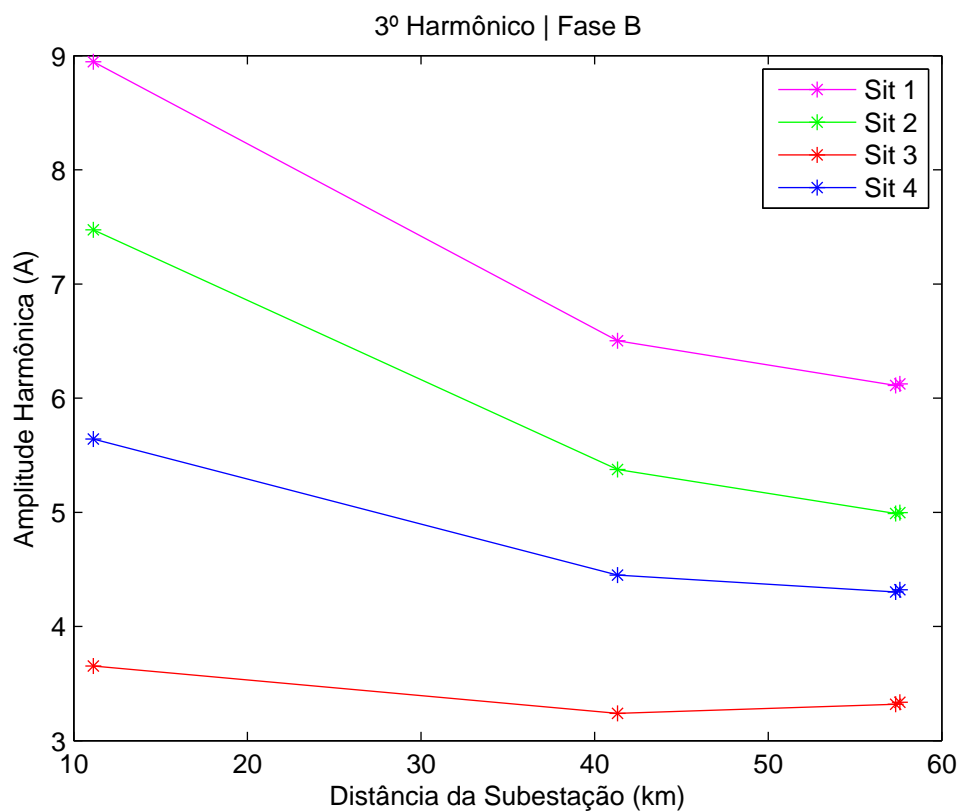


Figura 47 – FAI por Contado Indireto - Amplitude do 3º Harmônico × distância da subestação

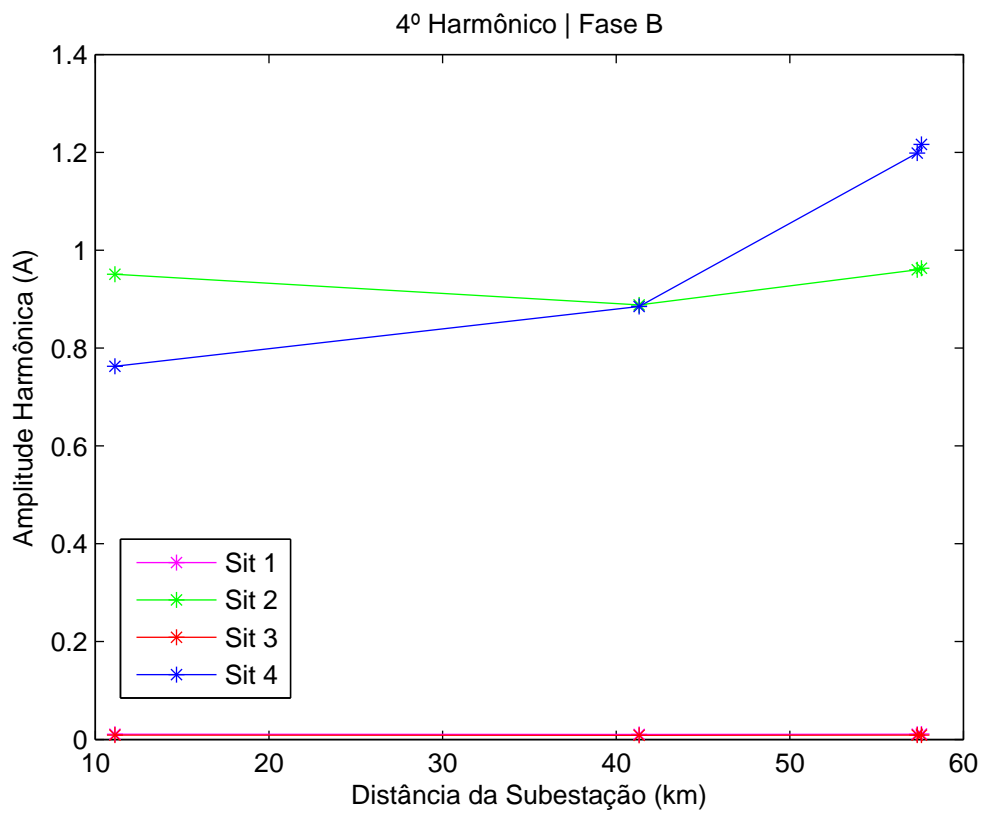


Figura 48 – FAI por Contado Indireto - Amplitude do 4º Harmônico × distância da subestação

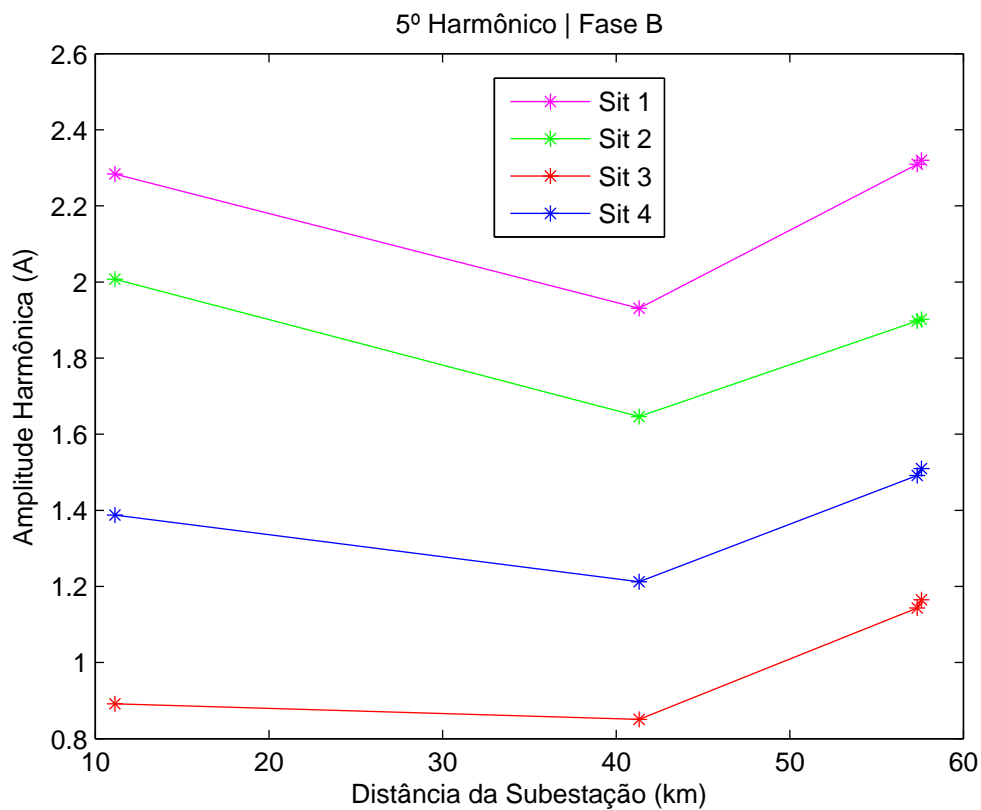


Figura 49 – FAI por Contado Indireto - Amplitude do 5º Harmônico × distância da subestação

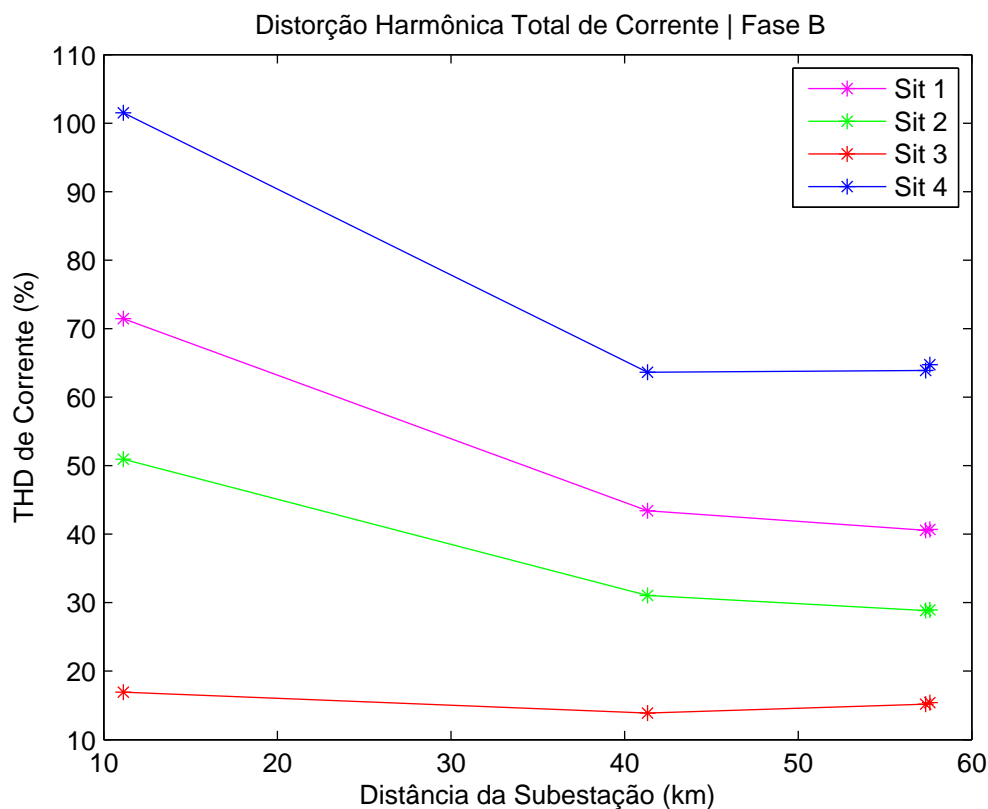


Figura 50 – FAI por Contado Indireto - Distorção Harmônica Total (DHT) × distância da subestação

Para comprovar a atuação dos reguladores nesse comportamento descrito, foi feita uma simulação sem os reguladores para a Situação 1. As Situações 2, 3 e 4 continuaram com os reguladores. A amplitude da componente fundamental teve uma mudança perceptível, como mostra a Figura 51. Entretanto, os outros harmônicos não apresentaram mudança evidente de comportamento, apesar de haver uma pequena alteração nas amplitudes.

Para chegar em conclusões mais embasadas, seria necessário realizar simulações para mais barras e mais casos. FAI por contato indireto fica, então, como uma possível continuação deste trabalho, um estudo futuro.

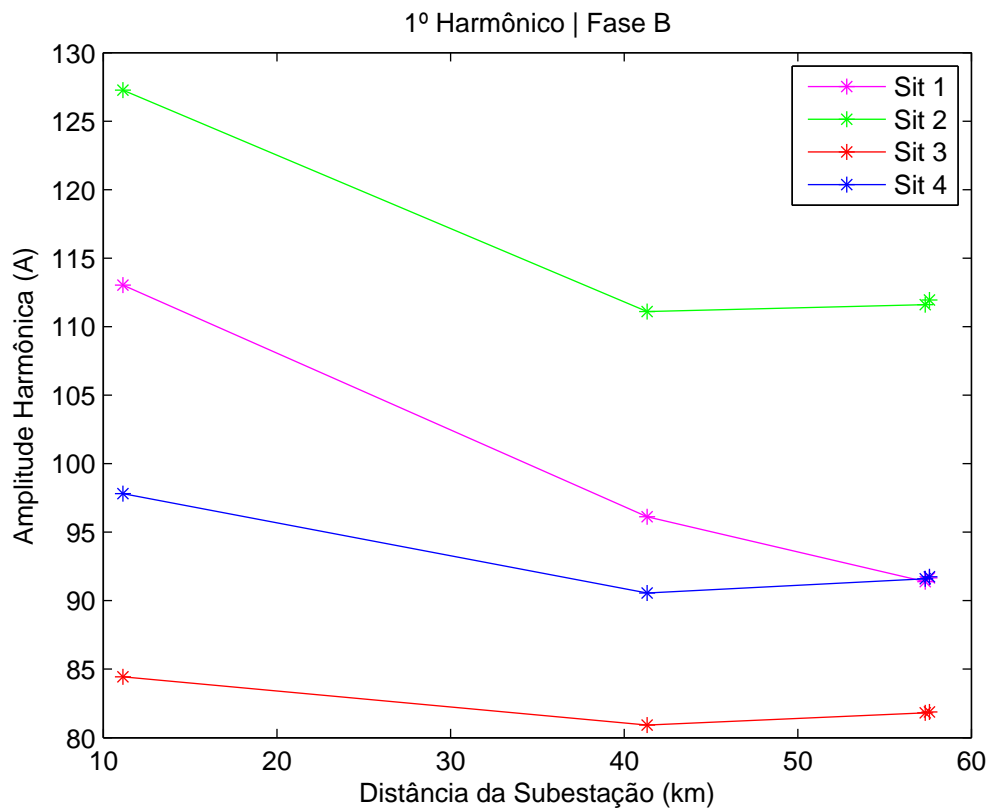


Figura 51 – FAI por Contado Indireto - Amplitude do 1º Harmônico  $\times$  distância da subestação - Sit1 sem reguladores

## 5.5 Análise dos resultados

As quatro situações analisadas mostraram comportamentos muito parecidos entre si, em cada uma das simulações deste capítulo. Isso demonstra que, para os valores típicos de uma FAI, as conclusões aqui obtidas são válidas em diversos casos, apenas com diferenças de amplitudes. Vale ressaltar que uma falta de alta impedância possui uma dinâmica complexa, portanto é difícil afirmar que os comportamentos aqui observados irão se repetir sempre da mesma maneira.

A seguir são mostradas conclusões obtidas do caso por contato direto e do indireto. Uma visão geral sobre o trabalho é mostrada no próximo capítulo.

### 5.5.1 FAI por Contato Direto - Com Perda de Carga

Um primeiro ponto a ser notado é que, quando há perda de carga, a componente fundamental não consegue indicar se houve uma FAI, pois sua amplitude pode variar muito de acordo com a perda de carga. Já as outras componentes harmônicas existem - em boa parte - devido à falta, podendo ser um indicativo de FAI (este trabalho não entrou na discussão da interferência harmônica de outros chaveamentos ou de cargas não-lineares no sistema de distribuição). Além disso, as amplitudes das componentes

harmônicas diminuem à medida que a falta se afasta da subestação.

Portanto, é possível dizer que a presença relevante de componentes harmônicas (principalmente 3<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup>) pode indicar a presença de FAI no sistema; além disso, a amplitude da componente fundamental e das componentes harmônicas podem dar uma ideia da distância da falta à subestação. Assim como o espectro, a Distorção Harmônica Total da corrente também pode indicar a possível presença de uma FAI e fornecer uma noção de distância.

### **5.5.2 FAI por Contato Indireto - Sem Perda de Carga**

Apesar de não ser foco deste trabalho, a análise de FAI por contato indireto revelou pontos importantes. Há, por exemplo, interferência dos reguladores de tensão nas amplitudes das componentes do espectro. Pelas simulações feitas, foi possível perceber que essa interferência causou mudança de comportamento na componente fundamental, mas não alterou significativamente o comportamento das componentes harmônicas. Assim como no caso de contato direto, tem-se mais um indício de que a componente fundamental pode não ser um bom indicador da ocorrência de FAI, além de reforçar a possibilidade de perceber essa ocorrência pelas componentes harmônicas.



---

## Conclusão

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica, com o intuito de encontrar padrões que pudessem indicar a ocorrência deste tipo falta (baseando-se nas correntes medidas na subestação).

Primeiramente foi realizado um estudo da literatura, de modo a entender as principais características de uma FAI e escolher um modelo adequado às simulações. Também foram levantados valores típicos de corrente e dos parâmetros utilizados no modelo escolhido.

Em seguida, foram feitas simulações em um sistema fictício de uma barra, a fim de entender como o modelo elétrico escolhido se comporta diante das variações dos parâmetros (resistências e amplitudes das fontes CC).

Conhecendo o comportamento do modelo, foram realizadas simulações no sistema IEEE de 34 barras para dois casos: FAI por contato direto (com perda de carga) e FAI por contato indireto (sem perda de carga). Apesar de o primeiro caso ser o foco deste trabalho, a análise de ambos trouxeram resultados importantes.

Um dos resultados foi a percepção de que a componente fundamental pode não ser uma boa indicadora da ocorrência da falta, já que seu comportamento sofre bastante influência de outros fatores, como por exemplo a presença de reguladores no sistema. Outro ponto observado é a possível utilização das componentes harmônicas e da Distorção Harmônica Total como indicadores da ocorrência de FAI, já que apresentaram um comportamento bem definido em todas as simulações.

Vale ressaltar que este trabalho não se propôs a analisar a influência de outros eventos no sistema, como por exemplo um chaveamento de banco de capacitores ou a presença de cargas não lineares no sistema de distribuição. A literatura mostra que ambos influenciam no espectro harmônico e dificultam a detecção de uma FAI.

Apesar da análise deste trabalho não envolver um número muito grande de casos e de não buscar diferenciar eventos que se parecem com uma falta de alta impedância, é possível ter uma noção de quais ferramentas podem ser utilizadas para uma primeira análise na detecção de FAI em um sistema de distribuição.





---

## Referências

- AUCOIN, B. M.; RUSSELL, B. D. Detection of incipient and low current faults in electric distribution systems [of spacecraft]. In: **Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference**. [S.l.: s.n.], 1989. p. 153–158 vol.1.
- CALHOUN, H.; BISHOP, M. T.; EICHLER, C. H.; LEE, R. E. Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors. **IEEE Power Engineering Review**, 1982. PER-2, n. 6, p. 50–51, June 1982. ISSN 0272-1724.
- CHEN, J. C.; PHUNG, B. T.; ZHANG, D. M.; BLACKBURN, T.; AMBIKAI RAJAH, E. Study on high impedance fault arcing current characteristics. In: **2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- EMANUEL, A. E.; CYGANSKI, D.; ORR, J. A.; SHILLER, S.; GULACHENSKI, E. M. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1990. v. 5, n. 2, p. 676–686, Apr 1990. ISSN 0885-8977.
- FANUCCHI, R. Z. **A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas wavelets e redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-14102014-092706/en.php>>.
- FLOYD, H. L.; DOAN, D. R.; WU, C. T.; LOVASIC, S. L. Arc flash hazards and electrical safety program implementation. In: **Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 3, p. 1919–1923 Vol. 3. ISSN 0197-2618.
- IEEE. **High Impedance Fault Detection Technology. Report of PSRC Working Group D15**. [S.l.], mar. 1996. Disponível em: <[http://www.pes-psrc.org/Reports-/High\\_Impedance\\_Fault\\_Detection\\_Technology.pdf](http://www.pes-psrc.org/Reports-/High_Impedance_Fault_Detection_Technology.pdf)>.
- \_\_\_\_\_. **Distribution Test Feeders**. ago. 2013. Disponível em: <<https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>.
- JEERINGS, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1989. v. 4, n. 2, p. 54–54, Apr 1989. ISSN 0885-8977.

KWON, W.; PARK, Y.; LEE, G.; YOON, M.; YOO, M. Detection of high impedance faults using the randomness of even harmonic currents. **IFAC Proceedings Volumes**, 1989. v. 22, n. 9, p. 333 – 338, 1989. ISSN 1474-6670. IFAC Symposium on Power Systems and Power Plant Control 1989, Seoul, Korea, 22-25 August 1989. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017532929>>.

LAI, T. M.; SNIDER, L. A.; LO, E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. **Electric Power Systems Research**, 2006. v. 76, n. 8, p. 626–633, 2006.

LAI, T. M.; SNIDER, L. A.; LO, E.; SUTANTO, D. High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and rms conversion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2005. v. 20, n. 1, p. 397–407, Jan 2005. ISSN 0885-8977.

LAZKANO, A.; RUIZ, J.; LETURIONDO, L. A.; ARAMENDI, E. High impedance arcing fault detector for three-wire power distribution networks. In: **2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries. Proceedings. MeleCon 2000 (Cat. No.00CH37099)**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 3, p. 899–902 vol.3.

LEE, R. E.; BISHOP, M. T. A comparison of measured high impedance fault data to digital computer modeling results. **IEEE Power Engineering Review**, 1985. PER-5, n. 10, p. 35–36, Oct 1985. ISSN 0272-1724.

MATHWORKS. **Fast Fourier transform**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html>>.

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2006.

NAM, S. R.; PARK, J. K.; KANG, Y. C.; KIM, T. H. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 1175–1180 vol.2.

OLIVEIRA JÚNIOR, D. A. D. **Faltas de alta impedância: detecção e localização de rompimento de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão**. Dissertação (mathesis) — Universidade Federal de Minas Gerais, maio 2006. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1843/AVFV-6WHFU5>>.

RODRIGUES, A. M.

**INFLUÊNCIA DA DISTORÇÃO HARMÔNICA E DE DESEQUILIBRIOS EM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA ATIVA** — Universidade Federal do Paraná, 2010.

RUSSELL, B. D.; CHINCHALI, R. P.; KIM, C. J. Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1988. v. 3, n. 4, p. 1485–1492, Oct 1988. ISSN 0885-8977.

SHARAF, A. M.; SNIDER, L. A.; DEBNATH, K. A neural network based relaying scheme for distribution system high impedance fault detection. In: **Proceedings 1993 The First New Zealand International Two-Stream Conference on Artificial Neural Networks and Expert Systems**. [S.l.: s.n.], 1993. p. 321–324.

SIMAS, E. Processamento digital de sinais, aula 02 - operações e transformações em sinais no tempo discreto. 2012. Disponível em: <[http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/PDS\\_aula02.pdf](http://www.dee.eng.ufba.br/home/simas/PDS_aula02.pdf)>.

WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. In: **1998 Rural Electric Power Conference Presented at 42nd Annual Conference**. [S.l.: s.n.], 1998. p. c5–1–5.



# Apêndices



## FAI por Contato Direto - Outros Cenários

Este Apêndice mostra, para uma FAI por contato direto, cenários diferentes (com parâmetros diferentes) dos mostrados nas simulações deste trabalho, a fim de comprovar as conclusões obtidas. As conclusões aqui obtidas são as mesmas mostradas na Seção 5.3.

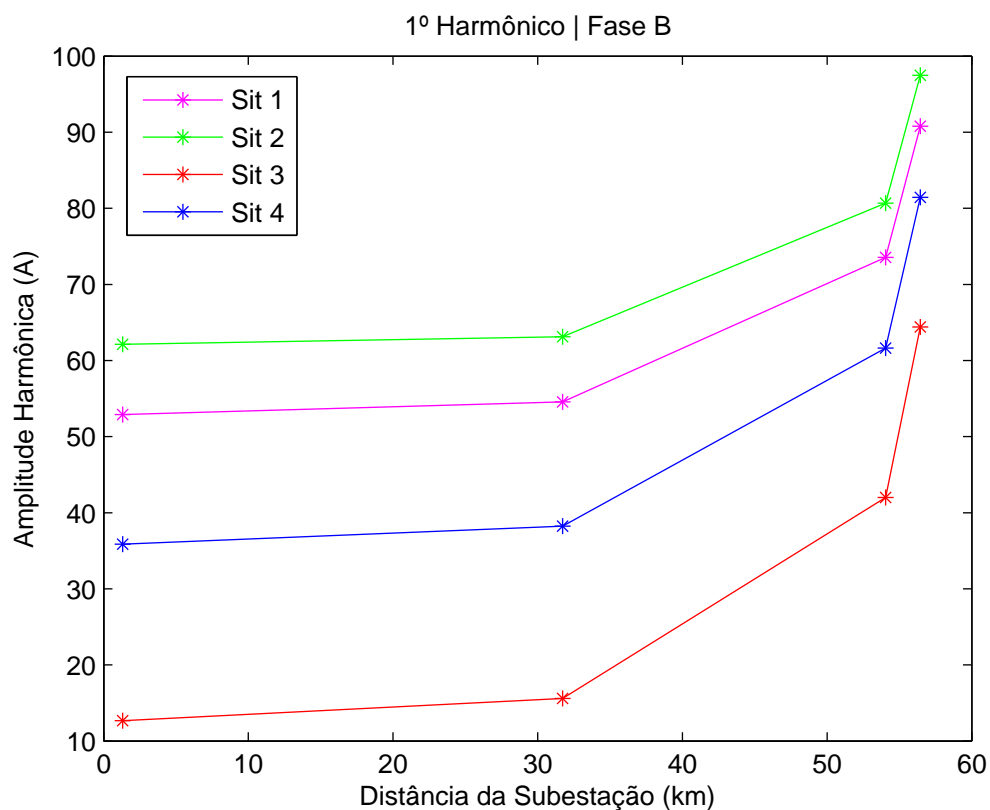


Figura 52 – FAI por Contato Direto - Outros Cenários - Amplitude do 1º Harmônico × distância da subestação

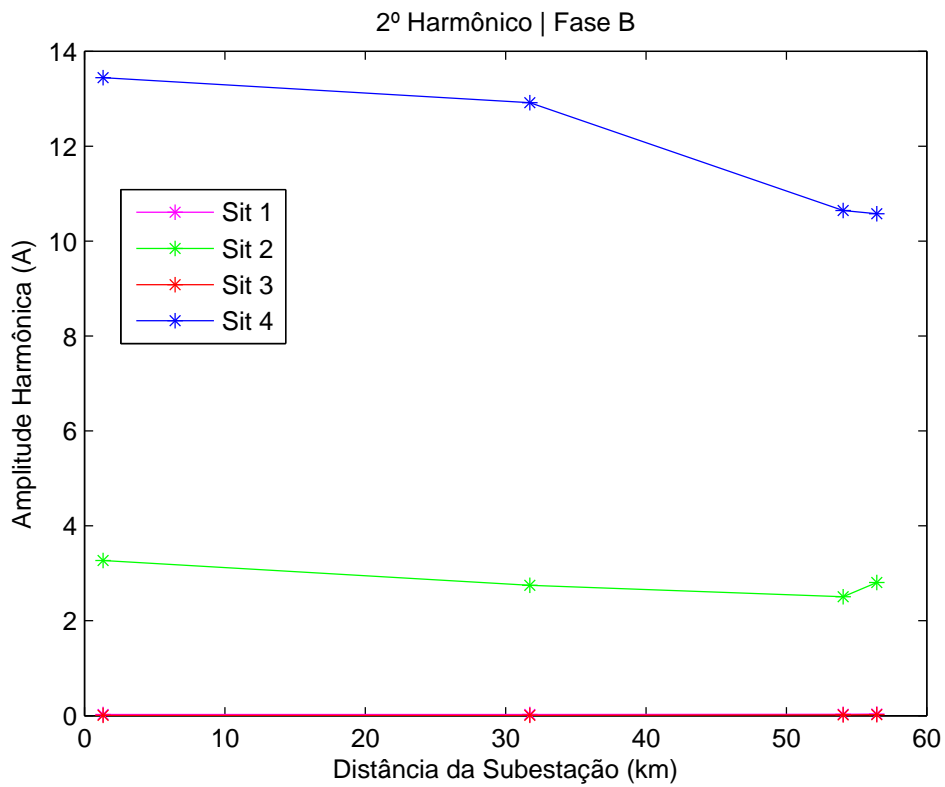


Figura 53 – FAI por Contato Direto - Outros Cenários - Amplitude do 2º Harmônico × distância da subestação

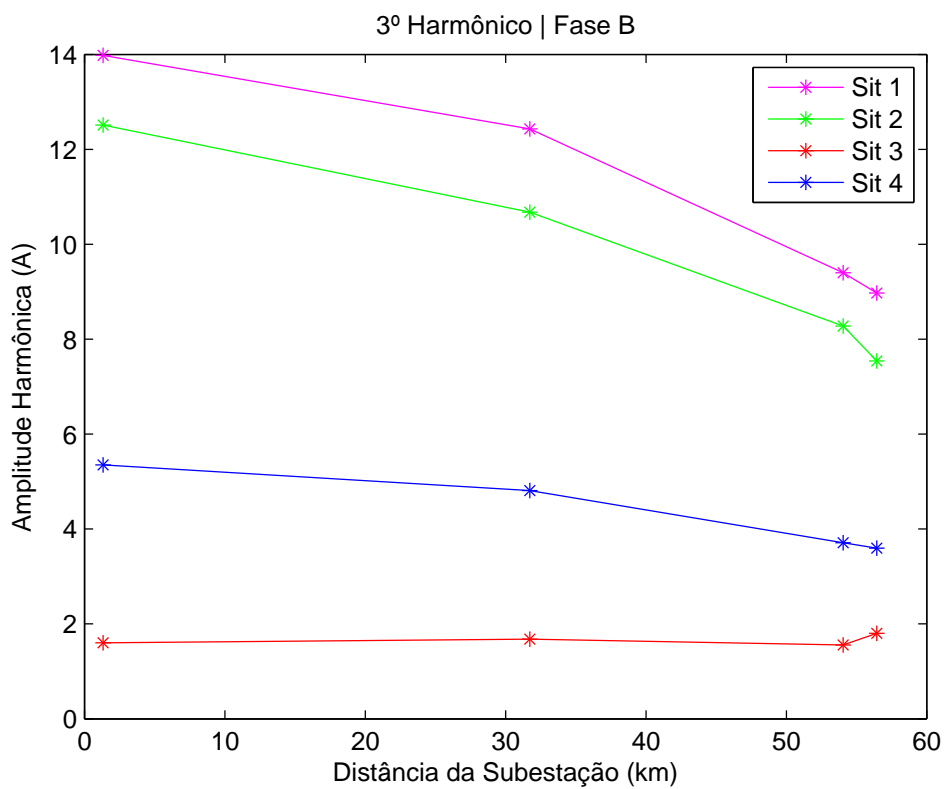


Figura 54 – FAI por Contato Direto - Outros Cenários - Amplitude do 3º Harmônico × distância da subestação



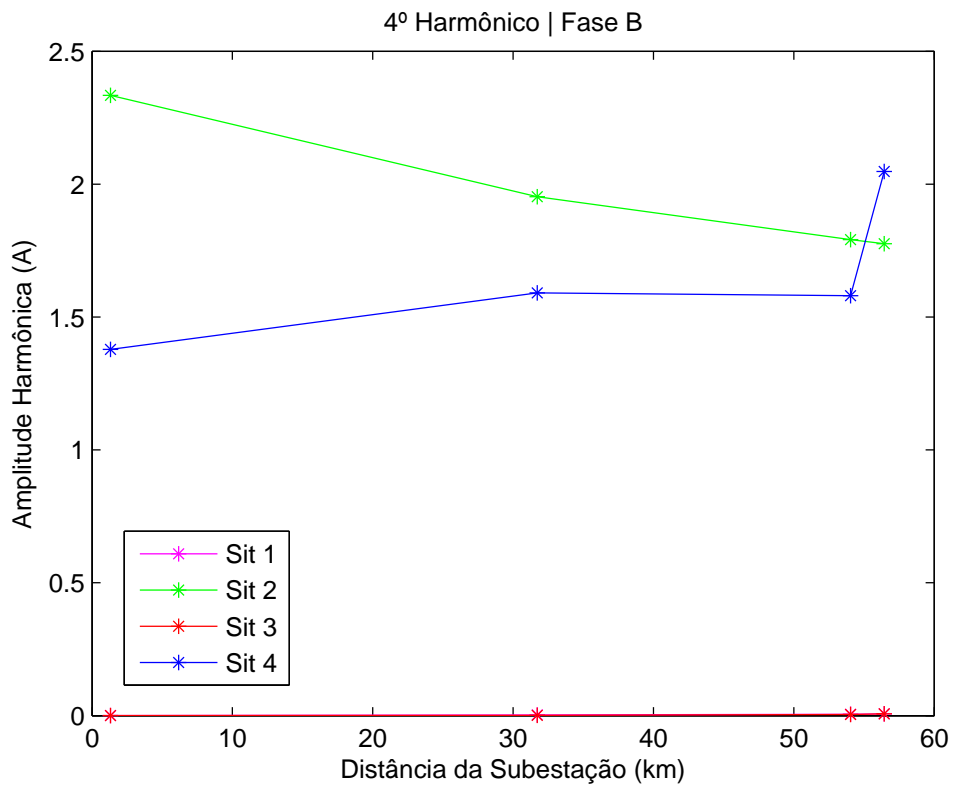


Figura 55 – FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 4º Harmônico × distância da subestação

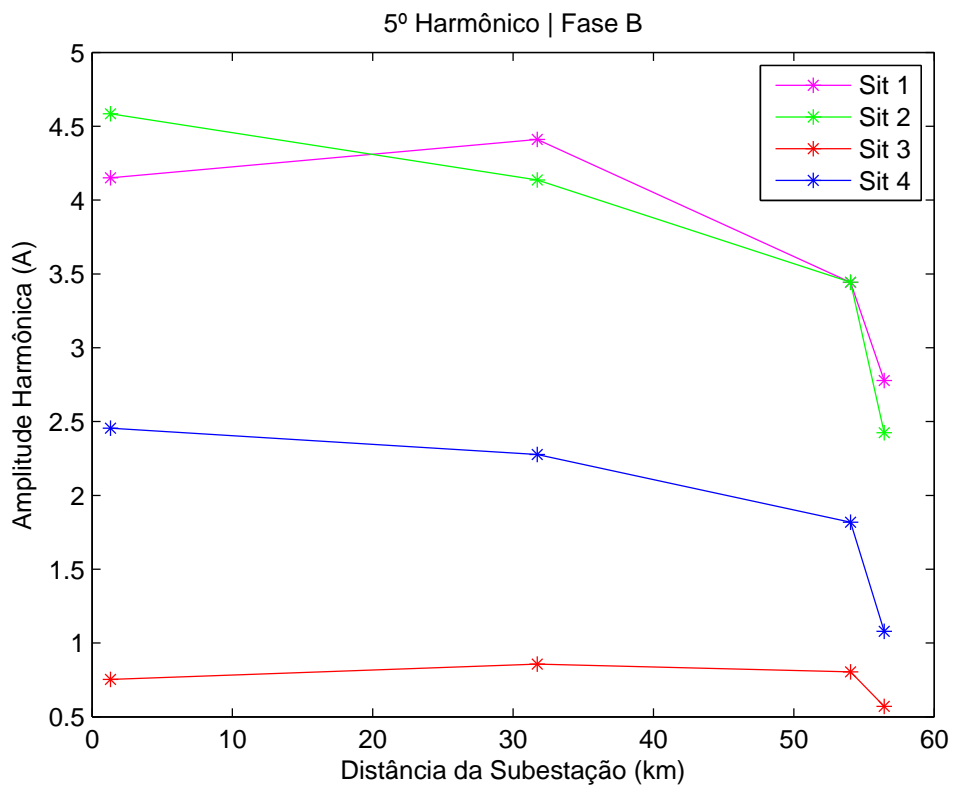


Figura 56 – FAI por Contado Direto - Outros Cenários - Amplitude do 5º Harmônico × distância da subestação

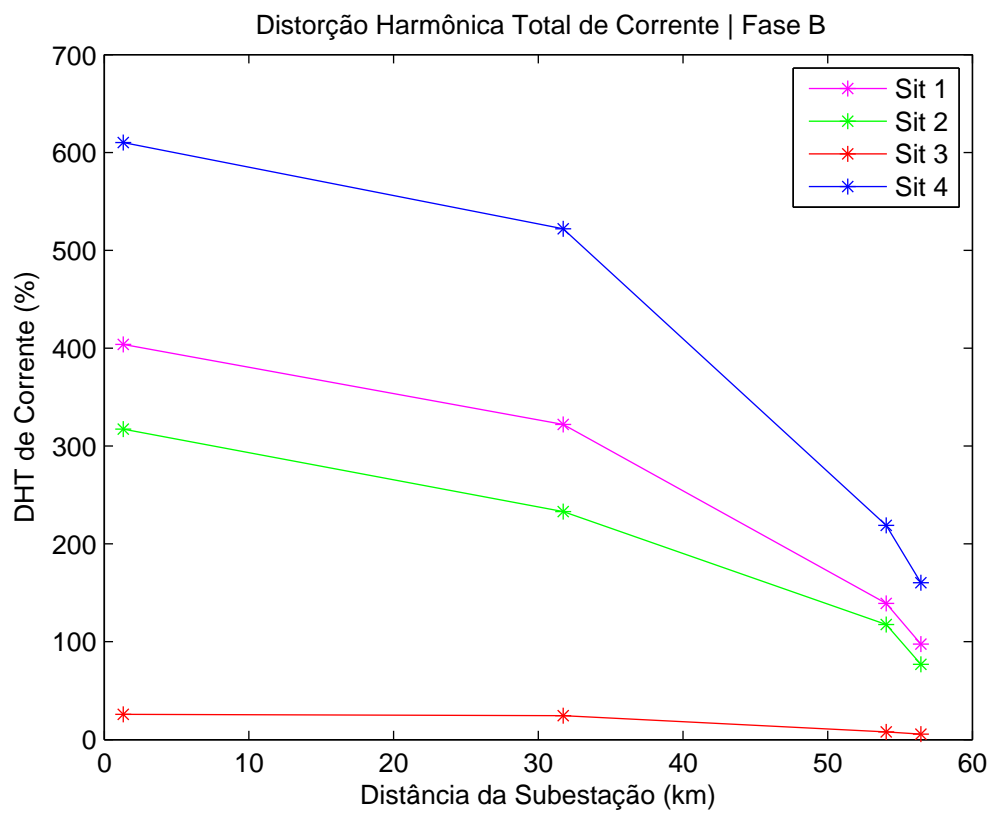


Figura 57 – FAI por Contato Direto - Outros Cenários - Distorção Harmônica Total (DHT) × distância da subestação