



JONAS LEMOS TALAISYS

**CONTEÚDO HARMÔNICO E ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DE
ARCOS ELÉTRICOS GERADOS ARTIFICIALMENTE EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

***HARMONIC CONTENT AND ESTIMATION OF LENGTH VARIATION OF
ARTIFICIALLY GENERATED ELECTRICAL ARC IN TRANSMISSION LINES***

**CAMPINAS
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

JONAS LEMOS TALAISYS

CONTEÚDO HARMÔNICO E ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO
DE ARCOS ELÉTRICOS GERADOS ARTIFICIALMENTE EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO

*HARMONIC CONTENT AND ESTIMATION OF LENGTH VARIATION OF
ARTIFICIALLY GENERATED ELECTRICAL ARC IN TRANSMISSION LINES*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Master dissertation presented to the Electrical Engineering Postgraduation Program of the School of Electrical and Computing Engineering of the University of Campinas to obtain the M.Sc. grade in Electrical Engineering, in field of Electric Power.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Tutores: Professor Maria Cristina Dias Tavares

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO JONAS LEMOS TALAISYS
E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARIA CRISTINA DIAS TAVARES

CAMPINAS
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

T141c Talaisys, Jonas Lemos
Conteúdo harmônico e estimativa da variação de comprimento de arcos elétricos gerados artificialmente em linhas de transmissão / Jonas Lemos Talaisys. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Análise harmônica. 2. Linhas elétricas aéreas. 3. Transitórios (Eletricidade). 4. Energia elétrica. I. Tavares, Maria Cristina Dias, 1962-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Harmonic content and estimation of length variation of artificially generated electrical arc in transmission lines

Palavras-chave em Inglês: Harmonic analysis, Electric lines flights, Transients (Electricity), Electric power

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Alessandra de Sa e Benevides Camara, Patricia Mestas Valero

Data da defesa: 30/07/2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

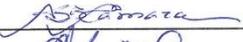
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Jonas Lemos Talaisys

Data da Defesa: 30 de julho de 2012

Título da Tese: "Conteúdo Harmônico e Estimativa da Variação de Comprimento de Arcos Elétricos Gerados Artificialmente em Linhas de Transmissão"

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente):  _____

Dra. Alessandra de Sa e Benevides Camara:  _____

Dra. Patricia Mestas Valero:  _____

A todos que um dia comigo já estiveram, e àqueles que um dia comigo estarão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz Fernando e Marlene, por tantas atitudes que tomaram em suas vidas visando proporcionar a este filho um desenvolvimento adequado, tendo como um dos pilares o constante apoio e farto acesso à educação acadêmica. Foram atitudes que sei que só mesmos os pais são capazes de ter por seus filhos.

A todos os demais familiares que, cada qual a sua maneira, sempre valorizaram esta busca pelo conhecimento, tornando-se uma fonte de motivação indispensável nos momentos de maior dificuldade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

À UNICAMP, que desde minha matrícula no início da graduação me ofereceu os recursos necessários em diversos âmbitos - desde alimentação e moradia a laboratórios bem equipados, ambientes agradáveis e pessoal qualificado - possibilitando que eu trilhasse meu caminho com autonomia e liberdade.

À minha orientadora, Profa. Maria Cristina, pela confiança depositada e pelo profissionalismo que sempre demonstrou nestes anos em que estivemos juntos. Também pela sua ajuda e compreensão em diversos momentos, sem os quais certamente não teria chegado até esta página de agradecimentos. Minha sincera gratidão.

Aos muitos amigos que fiz aqui na universidade: amigos da FEEC, da moradia estudantil, da equipe de atletismo, do LABEX, da FEF, entre outros. Com toda sua diversidade enriqueceram e tornaram muito mais agradável esta minha longa passagem por esta universidade.

A minha noiva, Chaiene, por sempre estar ao meu lado. Por insistentemente mostrar que há motivos para seguir em frente e fazer planos. Que o mundo ainda tem jeito, pois ainda há pessoas maravilhosas. Maravilhosas como ela.

“Escolhe um trabalho de que gostes e não terás que trabalhar nem um dia sequer na tua vida.”

(Confucio)

RESUMO

Este trabalho apresenta resultados do estudo do conteúdo harmônico e da variação do comprimento de arcos elétricos longos, com comprimento inicial superior a 4 m. Os resultados decorreram da análise de uma grande quantidade de dados obtidos de 647 ensaios realizados em ambiente não confinado em um trecho experimental de linha de transmissão aérea de 500 kV. Diversos níveis de corrente de arco foram abrangidos, desde 15 A_{ef} até 10.000 A_{ef}.

O conteúdo harmônico da tensão e da corrente dos arcos foi analisado através da Transformada de Fourier Discreta em Tempo Reduzido. Mediante um tratamento estatístico, este conteúdo harmônico possibilitou a consolidação da assinatura harmônica dos arcos estudados. Uma contribuição importante da pesquisa consiste na verificação de que o conteúdo harmônico do arco pode ser utilizado para identificar o momento a partir do qual o arco elétrico se encontra com suas características elétricas estabilizadas. A partir deste instante os parâmetros elétricos do arco podem ser utilizados para obtenção de um modelo matemático.

Utilizando-se do conteúdo harmônico e de registros visuais, a variação de comprimento foi obtida para 69 arcos. Esta análise inicial permite que se tenha uma noção da velocidade de alongamento destes arcos em relação ao seu nível de corrente. Permitiu também a obtenção de um gradiente de tensão mais preciso dos arcos, considerando-se tanto o alongamento quanto a estabilidade destes.

Por fim, este trabalho tem por objetivo apresentar resultados que forneçam características e informações relevantes à obtenção de um modelo matemático de arco elétrico secundário adequado para o estudo da Manobra de Abertura e Religamento Monopolar. O conteúdo harmônico é identificado como uma ferramenta eficaz para caracterização da estabilidade destes arcos e o alongamento é um dos principais fatores relacionados com a extinção e duração do arco secundário.

Palavras-chave: Arco secundário. Comprimento do arco. Conteúdo harmônico. Instante de estabilização do arco. Manobra de abertura e religamento monopolar.

ABSTRACT

This document presents results related to harmonic content and length variation of long electrical arcs in air, with initial length of 4 m. The results are based in the analysis of a database containing 647 experiments in non-confined environment of an experimental aerial 500 kV transmission line. The current range analyzed lies between 15 A_{rms} and 10,000 A_{rms} .

The harmonic contents of voltage and current of electrical arcs were analyzed by the Short Time Discrete Fourier Transform. Using a statistic treatment this harmonic content allowed to consolidate the harmonic signature of the arcs in study. Furthermore, in the present work it was proposed that the harmonic content of an electrical arc defines the moment when the electric arc has its electrical characteristics stabilized. This instant is crucial to obtain the correct arc electrical parameters that will be used to represent the arc.

Using the harmonic content and visual data, the variation in length was obtained for 69 arcs. This initial analysis led to arc elongation velocity regarding the current level and permitted to obtaining a more precise arc voltage gradient, considering both elongation as its stability.

Finally, this work aims to supply relevant characteristics and information to obtaining a secondary arc model useful to the Single-Phase Autoreclosing Maneuver study. The harmonic content is an efficient way to characterize these arcs and the arc elongation is one of the main factors related to the duration and self-extinction of the secondary arc.

Keywords: *Secondary arc. Arc length. Harmonic analysis. Instant of arc stabilization. Single-phase autoreclosing, SPAR.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sistema de Transmissão SIN - Horizonte 2012.	3
Figura 2.1: Esquema simplificado de religamento monopolar tradicional.....	11
Figura 2.2: Circuito equivalente em uma manobra de religamento monofásico.....	12
Figura 2.3: Corrente de arco x Primeiro pico da tensão de restabelecimento transitório (TRT), retirada de Câmara [8].	13
Figura 2.4: : Esquema de conexão de reatores em derivação com 4 pernas.....	14
Figura 2.5: Esquema trifásico de conexão de chaves de aterramento de alta velocidade.	15
Figura 3.1: Desenvolvimento de um arco elétrico experimental no ar.....	20
Figura 3.2: Curvas de tensão e corrente para um ensaio de arco elétrico em linha de 400 kV, retirada de Prikler [19].	21
Figura 3.3: Espectro harmônico da tensão de um arco elétrico, extraído de Djuric [28].	27
Figura 4.1: Estrutura das torres 500 kV dos ensaios.	29
Figura 4.2: Representação esquemática do circuito elétrico empregado para a geração da corrente sustentada do arco.....	30
Figura 4.3: Formação de arco em ensaio do CEPTEL.....	32
Figura 4.4: Esboço da disposição das estruturas de ensaio (vista superior).....	33
Figura 5.1: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A _{ef}	36
Figura 5.2: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A _{ef} entre 100 ms e 200 ms.	36
Figura 5.3: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A _{ef} e entre 800 ms e 900 ms.	36
Figura 5.4: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 200 A _{ef}	39
Figura 5.5: Amplitude das pseudo-harmônicas de ordem ímpar da tensão do arco classe 200 A _{ef}	39
Figura 5.6: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e a de 1ª ordem de arco classe 200 A _{ef}	40

Figura 5.7: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem par e a de 1ª ordem de arco classe 200 A _{ef} .	40
Figura 5.8: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e a de 1ª ordem de arco classe 200 A _{ef} .	41
Figura 5.9: Relação média entre a pseudo-harmônica de 3ª ordem e a de 1ª ordem de tensão.	45
Figura 5.10: Relação média entre a pseudo-harmônica de 5ª ordem e a de 1ª ordem de tensão. ..	45
Figura 6.1: Instantes iniciais de um ensaio classe 60 A _{ef} .	50
Figura 6.2: Comparação entre o alongamento do arco e a primeira pseudo-harmônica de tensão.	51
Figura 6.3: Momento em que foi estabelecida a relação comprimento-tensão para ensaio com resultado coerente.	52
Figura 6.4: Momento em que foi estabelecida a relação comprimento-tensão para ensaio com resultado inconsistente.	52
Figura 6.5: Instante em que o arco se estabiliza para quatro diferentes testes: (I) arco classe 30 A _{ef} , (II) arco classe 60 A _{ef} , (III) arco classe 100 A _{ef} e (IV) arco classe 500 A _{ef} .	53
Figura 6.6: Estimativa de comprimento para arcos classe 60 A _{ef} .	55
Figura 6.7: Estimativa de comprimento para arcos classe 300 A _{ef} .	55
Figura 6.8: Estimativa de comprimento para três arcos representativos da classe 60 A _{ef} .	56
Figura 6.9: Estimativa de comprimento para três arcos representativos da classe 300 A _{ef} .	56
Figura 6.10: Arco classe 15 A _{ef} após 300 ms de sua ignição.	57
Figura 6.11: Gradiente de tensão dos arcos elétricos.	58
Figura 6.12: Comparativo dos resultados de E _a obtidos com valores encontrados na literatura..	60
Figura A.1: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 15 A _{ef} .	70
Figura A.2: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 15 A _{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	71
Figura A.3: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 20 A _{ef} .	72
Figura A.4: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 20 A _{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	73
Figura A.5: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 30 A _{ef} .	74
Figura A.6: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 30 A _{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	75

Figura A.7: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 50 A_{ef}	76
Figura A.8: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 50 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	77
Figura A.9: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 60 A_{ef}	78
Figura A.10: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 60 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	79
Figura A.11: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 100 A_{ef}	80
Figura A.12: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 100 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	81
Figura A.13: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 150 A_{ef}	82
Figura A.14: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 150 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	83
Figura A.15: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 300 A_{ef}	84
Figura A.16: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 300 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	85
Figura A.17: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 500 A_{ef}	86
Figura A.18: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 500 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	87
Figura A.19: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 1.000 A_{ef}	88
Figura A.20: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 1.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	89
Figura A.21: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 3.000 A_{ef}	90
Figura A.22: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 3.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	91
Figura A.23: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 5.000 A_{ef}	92
Figura A.24: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 5.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	93
Figura A.25: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 10.000 A_{ef} ...	94
Figura A.26: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 10.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.	95
Figura B.1: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 15 A_{ef} ...	98

Figura B.2: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 15 A_{ef} .	98
Figura B.3: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 15 A_{ef} .	98
Figura B.4: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 20 A_{ef} .	99
Figura B.5: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 20 A_{ef} .	99
Figura B.6: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 20 A_{ef} .	99
Figura B.7: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 30 A_{ef} .	100
Figura B.8: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 30 A_{ef} .	100
Figura B.9: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 30 A_{ef} .	100
Figura B.10: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 50 A_{ef} .	101
Figura B.11: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 50 A_{ef} .	101
Figura B.12: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 50 A_{ef} .	101
Figura B.13: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 60 A_{ef} .	102
Figura B.14: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 60 A_{ef} .	102
Figura B.15: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 60 A_{ef} .	102
Figura B.16: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 100 A_{ef} .	103
Figura B.17: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 100 A_{ef} .	103
Figura B.18: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 100 A_{ef} .	103

Figura B.19: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 150 A _{ef} .	104
Figura B.20: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 150 A _{ef} .	104
Figura B.21: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 150 A _{ef} .	104
Figura B.22: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 300 A _{ef} .	105
Figura B.23: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 300 A _{ef} .	105
Figura B.24: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 300 A _{ef} .	105
Figura B.25: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 500 A _{ef} .	106
Figura B.26: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 500 A _{ef} .	106
Figura B.27: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 500 A _{ef} .	106
Figura B.28: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 1000 A _{ef} .	107
Figura B.29: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 1000 A _{ef} .	107
Figura B.30: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 1000 A _{ef} .	107
Figura B.31: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 3000 A _{ef} .	108
Figura B.32: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 3000 A _{ef} .	108
Figura B.33: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 3000 A _{ef} .	108
Figura B.34: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 5000 A _{ef} .	109

Figura B.35: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 5000 A_{ef} .	109
Figura B.36: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 5000 A_{ef} .	109
Figura B.37: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de arco classe 10.000 A_{ef} .	110
Figura B.38: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 10.000 A_{ef} .	110
Figura B.39: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 10.000 A_{ef} .	110
Figura C.1: Estimativa de comprimento para arcos classe 15 A_{ef} .	112
Figura C. 2: Estimativa de comprimento para arcos classe 20 A_{ef} .	113
Figura C. 3: Estimativa de comprimento para arcos classe 30 A_{ef} .	114
Figura C. 4: Estimativa de comprimento para arcos classe 100 A_{ef} .	115
Figura C. 5: Estimativa de comprimento para arcos classe 150 A_{ef} .	116
Figura C. 6: Estimativa de comprimento para arcos classe 200 A_{ef} .	117
Figura C. 7: Estimativa de comprimento para arco classe 500 A_{ef} .	118
Figura C. 8: Estimativa de comprimento para arcos classe 1000 A_{ef} .	119
Figura C. 9: Estimativa de comprimento para arcos classe 5000 A_{ef} .	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Ocorrência de faltas de natureza elétrica no SIN em 2006, retirada de Frontin [2].	1
Tabela 3.1: Modelos de arcos elétricos do tipo caixa-preta, extraída de Dupont [21]	24
Tabela 5.1: Número de ensaios de arcos elétricos validados.	37
Tabela 5.2: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte I.....	44
Tabela 5.3: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte II	44
Tabela 5.4: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte III.....	44
Tabela 6.1: Estimativa da Variação de Comprimento do Arco.....	54
Tabela 6.2: Gradiente de tensão dos arcos elétricos.....	58

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 <i>Motivação</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	5
1.3 <i>Estrutura da dissertação</i>	6
1.4 <i>Publicações</i>	7
2 Estudo da manobra de abertura e religamento monofásico.....	9
2.1 <i>Falta monofásica transitória</i>	9
2.2 <i>Manobra de abertura e religamento monofásico</i>	10
2.3 <i>Métodos para redução da corrente de arco secundário</i>	14
3 arco elétrico	17
3.1 <i>Formação, sustentação e extinção de um arco elétrico</i>	17
3.2 <i>Modelagem do arco elétrico</i>	21
3.3 <i>O arco elétrico longo no ar</i>	25
4 Ensaio de arco elétrico	29
5 Conteúdo harmônico	35
5.1 <i>Tratamento numérico inicial</i>	35
5.2 <i>Análise harmônica</i>	37
5.3 <i>Conteúdo harmônico</i>	42
6 Estimativa da variação de comprimento do arco elétrico.....	47
6.1 <i>Considerações iniciais</i>	47
6.2 <i>Verificação da estabilidade do arco a partir do conteúdo harmônico</i>	49
6.3 <i>Estimativa da variação de comprimento</i>	53

6.4 Gradiente de tensão do arco elétrico.....	57
7 Conclusão	61
Referências.....	63
Apêndice A	69
Apêndice B	97
Apêndice C	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A maioria das perturbações de um sistema elétrico ocorre nas linhas de transmissão. Para que se tenha uma noção quantitativa deste predomínio, observações em um sistema de 500 kV de médio porte, analisado durante uma década, mostraram que cerca de 87 % das interrupções acidentais no fornecimento de energia envolviam problemas nas linhas de transmissão [1]. Dentre estas perturbações que ocorrem nas linhas de transmissão a falta do tipo monofásica e transitória, ou seja, não permanente, é a mais comum. Esta característica é ainda mais acentuada às linhas de alta (≥ 69 kV) e extra-alta tensão (> 230 kV), nas quais o espaçamento entre os condutores de cada fase é maior, o que dificulta a ocorrência de faltas entre fases. A tabela 1.1, retirada de Frontin [2], ilustra este fato ao mostrar o número de faltas de natureza elétrica ocorridas no Sistema Interligado Nacional (SIN) no ano de 2006. A falta monofásica (curto fase-terra) responde por 73% do total das faltas nas linhas de 138 kV enquanto nas linhas de 500 kV este tipo de falta já responde por 91% do total.

Tabela 1.1: Ocorrência de faltas de natureza elétrica no SIN em 2006, retirada de Frontin [2].

Tensão (kV)	Naturezas Elétricas – 2006							
	01	02	03	04	34	99	Demais	Total
138	1962	136	129	312	42	17	102	2700
230	447	26	10	25	3	6	13	530
345	118	8	0	13	0	5	8	152
440	40	2	0	1	0	1	1	45
500	293	5	2	9	1	3	10	323
750	8	0	0	0	0	1	0	9
TOTAL	2868	177	141	360	46	33	134	3759
(%)	76,30	4,71	3,75	9,58	1,22	0,88	3,56	100,0

Legenda:
 01 – curto fase-terra
 02 – curto bifásico
 03 – curto trifásico
 04 – curto bifásico-terra
 34 – curto trifásico-terra
 99 – sem natureza elétrica

Tais características são especialmente relevantes quando é o SIN que está em questão. Isto porque o SIN é um sistema de grande porte com forte predominância de geração

hidroelétrica, o que acarreta em boa parte da geração estar localizada distante dos centros de carga. Linhas de transmissão extensas e de elevada tensão são então utilizadas para ligar os centros de geração aos de carga. Portanto, pelos dados apresentados, esta peculiaridade torna especialmente susceptível às faltas do tipo monofásico e transitório, evidenciando a necessidade de se lidar eficazmente com tal distúrbio, principalmente quando se considera a importância que algumas dessas linhas de transmissão, integrantes de importantes troncos de ligação, têm para a estabilidade do sistema como um todo. Além disso, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), somente para o período de 2012 - 2014 estão previstos 7.462 km de novas linhas de transmissão em 500 kV [3]. Adotar medidas adequadas para lidar com as faltas monofásicas transitórias já durante as etapas de projeto e construção destas linhas influenciaria positivamente na confiabilidade do sistema. Na fig. 1.1 é mostrado o panorama atual do sistema de transmissão do SIN [4], incluindo as linhas de transmissão previstas para entrarem em operação.

As faltas monofásicas transitórias são originadas por sobretensões transitórias capazes de superar a capacidade dielétrica do ar, rompendo o seu isolamento e estabelecendo um caminho de baixa impedância para o fluxo de corrente entre o condutor de uma das fases e a terra, o que impede que a transmissão de energia continue ocorrendo neste condutor. Neste caminho, chamado de arco elétrico, o ar encontra-se ionizado, um estado instável no qual o ar passa a ter baixa impedância, e poderá permanecer assim por tempo indeterminado enquanto uma corrente suficiente fluir por esse caminho.

Quando as linhas de transmissão são acometidas por tal distúrbio faz-se necessária uma intervenção dos sistemas de proteção que o elimine rapidamente de forma a manter a estabilidade do sistema e restabelecer o fornecimento de energia. Duas manobras possíveis para eliminar faltas transitórias envolvendo somente uma fase são a manobra de abertura e religamento trifásico e a manobra de abertura e religamento monofásico ou monopolar (MRM). Em ambas visa-se eliminar o arco elétrico suprimindo a corrente que o alimenta.

Na manobra de abertura e religamento trifásico, largamente utilizada pelas empresas do setor elétrico no Brasil atualmente, a fase sob falta e as fases sãs são abertas pelos disjuntores. A linha fica isolada em seus dois extremos interrompendo totalmente o fluxo de potência no trecho sob falta. Esta situação é mantida por um tempo pré-determinado, durante o qual há alta probabilidade de extinção da falta, e após o qual a linha é novamente reco-

nectada ao sistema. Esta solução implica em uma perturbação relativa mais severa ao sistema, pois para evitar sobretensões elevadas na manobra de religamento o tempo de abertura da linha é relativamente longo, com influência negativa na estabilidade eletromecânica e na qualidade do fornecimento de energia.

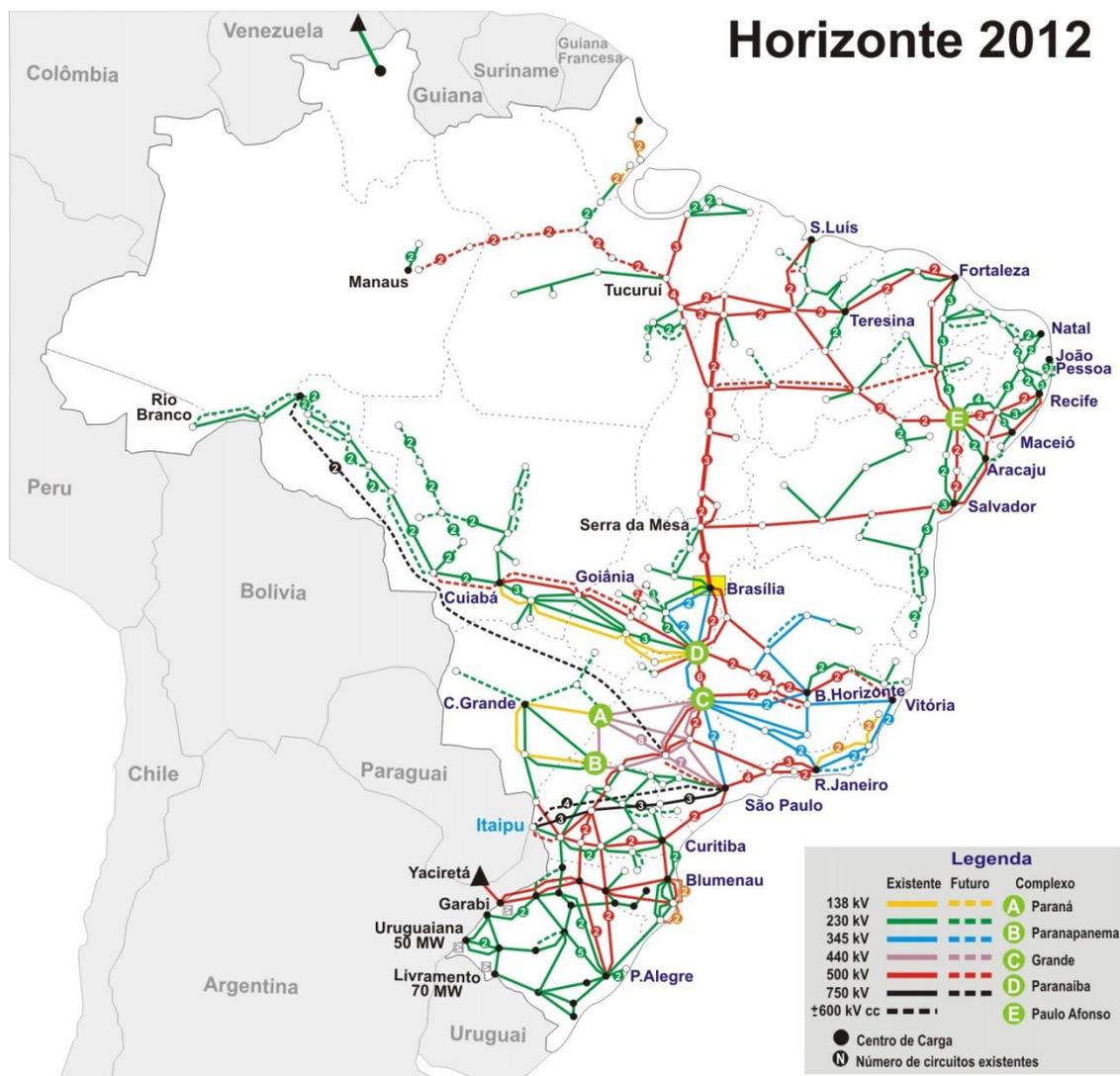


Figura 1.1: Sistema de Transmissão SIN - Horizonte 2012.

Já na MRM apenas a fase sob falta é desconectada nas suas extremidades por um intervalo de tempo pré-determinado, denominado tempo morto, tipicamente entre 0,5 e 1 segundo, em que se assegura uma alta probabilidade de extinção do arco. Após este tempo a linha é religada. Durante toda a manobra as demais fases continuam a transmitir energia,

possibilitando um fluxo em torno de 54% da potência total no caso de linhas simples e até 75% nas linhas com circuitos duplos [5]. Esta característica concede à MRM algumas vantagens perante a manobra trifásica, que conferem ao todo uma perturbação muito menor ao sistema:

- Melhor estabilidade no estado transitório;
- Redução das sobretensões no religamento;
- Redução de oscilações torcionais nos rotores dos geradores [6];
- Continuidade da transmissão de potência.

Obviamente, a MRM apenas será mais vantajosa se ela possuir um alto índice de sucesso na extinção do arco elétrico durante o tempo morto, pois caso haja falha, ou seja, o religamento ocorra com a falta ainda presente, uma nova manobra de abertura na linha, do tipo trifásica, será necessária, impondo uma perturbação muito maior ao sistema. O sucesso na operação da MRM está diretamente ligado ao comportamento do arco secundário durante a execução da manobra. O arco elétrico que se estabelece no início do defeito é denominado "arco primário", sendo o arco elétrico existente após a abertura dos terminais da fase sob defeito denominado de "arco secundário".

Esse arco secundário se mantém devido ao acoplamento capacitivo e indutivo entre a fase sob falta e as demais fases em operação, que impõem uma tensão na fase sob defeito e uma corrente fluindo pelo arco secundário. O êxito da MRM depende da extinção desse arco secundário durante o período de tempo morto, que, por sua vez, deve ser o menor possível visando minimizar distúrbios ao sistema. Entretanto o comportamento do arco secundário é muito complexo, o que torna sua previsão uma tarefa difícil.

Muitos já foram os modelos propostos para caracterizar o comportamento do arco elétrico, mas devido à sua citada complexidade não há ainda um modelo único que reproduza razoavelmente o seu comportamento como um todo. De forma geral cada modelo se utiliza de simplificações aplicáveis às condições específicas do tipo de arco elétrico que se pretende caracterizar, não representando com fidelidade o arco elétrico em outras circunstâncias. Além disso, os modelos de arco elétrico disponíveis na literatura atualmente foram desenvolvidos majoritariamente associando a ocorrência do fenômeno em disjuntores. Esses modelos não levam em consideração alguns dos parâmetros citados que influenciam na

extinção do arco secundário, o que gera a necessidade de um modelo de arco mais confiável para aplicação em arcos secundários.

Tal modelo resultaria em análises mais precisas e seguras para cada tipo de linha em relação à aplicabilidade da MRM. Isto possibilitaria, por exemplo, para cada falta ocorrida, saber de antemão se a MRM poderia seguramente sanar o problema ou se a manobra trifásica é a que deveria ser adotada já a princípio. No caso da MRM ser efetuada, permitiria um melhor dimensionamento do tempo em que a fase sob falta necessita ficar aberta para extinguir o arco elétrico, resultando em menor distúrbio ao sistema. Ainda, durante a fase de projeto da linha possibilitaria uma diminuição nos custos do empreendimento, visto que as análises usuais tendem a ser conservativas e imprecisas, resultando na aquisição de equipamentos superdimensionados.

Na busca de um modelo que atendesse a essas expectativas, iniciou-se em 2004 a realização de uma série de ensaios de arco elétrico em linhas de transmissão. Estes experimentos fazem parte do projeto de P&D ANEEL da carteira de FURNAS Centrais Elétricas S.A. intitulado: “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico” desenvolvido e coordenado pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), tendo a participação da FEEC/UNICAMP no tratamento dos dados e a parte experimental realizada no laboratório de alta tensão do Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho faz parte do projeto de pesquisa citado e tem por objetivo fornecer, a partir dos dados dos ensaios, características e informações relevantes à obtenção de um modelo de arco elétrico adequado para o estudo da MRM. Mais especificamente, neste trabalho são analisados o conteúdo harmônico e a variação de comprimento dos arcos elétricos gerados nos ensaios de campo. O conteúdo harmônico vem se mostrando uma eficaz ferramenta na caracterização destes arcos tanto para análises no domínio da frequência co-

mo no domínio do tempo, ou ainda no domínio híbrido tempo-frequência. Já a variação de comprimento é de extrema relevância na análise da extinção e duração do arco secundário.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente texto está dividido em 7 capítulos, o primeiro capítulo compreende a introdução geral do trabalho.

O capítulo 2 traz um breve estudo sobre a manobra de abertura e religamento monofásico, conceituando arco secundário e apresentado estratégias clássicas para redução deste arco.

No capítulo 3 o arco elétrico é analisado com mais detalhes, dando-se ênfase aos arcos elétricos longos no ar, como os estudados neste trabalho.

No capítulo 4 é descrito como os ensaios de arcos elétricos, que serviram de base para este trabalho, foram realizados.

O capítulo 5 mostra o tratamento numérico inicial para validação dos dados de ensaios recebidos, descreve como a análise harmônica é efetuada e por fim apresenta os resultados estatísticos obtidos para o conteúdo harmônico dos arcos.

No capítulo 6 é descrita a metodologia para a estimativa de comprimento dos arcos elétrico. São apresentados uma técnica para determinação do momento em que o arco pode ser considerado estável, os resultados acerca da estimativa de comprimento e também alguns resultados referentes ao gradiente de tensão do arco elétrico.

O capítulo 7 é reservado para as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

1.4 PUBLICAÇÕES

Durante esta pesquisa foram elaborados os seguintes trabalhos:

- "Conteúdo Harmônico da Corrente e Tensão de Arcos Elétricos Gerados Artificialmente em Ambiente não Confinado", XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito-MS, Brasil, Set.2010.
- "Current and Voltage Harmonic Content of Artificially Generated Electrical Arc in Out-Door Experiment", IPST - International Conference on Power Systems Transients, Delft, Holanda, Jun.2011.
- "Estimation of Length Variation of Artificially Generated Electrical Arc in Out-Door Experiments", IPST - International Conference on Power Systems Transients, Delft, Holanda, Jun.2011.
- "Harmonic Content and Estimation of Length Variation of Artificially Generated Electrical Arc in Out-Door Experiments", EPEC - Electrical Power and Energy Conference, Winnipeg, Canadá, Out.2011.

2 ESTUDO DA MANOBRA DE ABERTURA E RELIGAMENTO MONOFÁSICO

2.1 FALTA MONOFÁSICA TRANSITÓRIA

Uma falta em uma linha de transmissão pode ser caracterizada como um distúrbio capaz de comprometer a integridade desta linha com relação à sua continuidade ou isolamento, acarretando a interrupção total ou parcial da transmissão de energia à carga, devido ao caminho de baixa impedância que surge no ponto da falta.

O tipo de falta pode ser classificado quanto ao número de fases envolvidas (e se envolvem ou não a terra) e quanto ao seu tempo de duração. Com relação ao número de fases, é classificada como monofásica, bifásica ou trifásica, quando envolve uma, duas ou três fases, respectivamente, estando a presença da terra assegurada na monofásica e facultada nas demais. Quanto ao tempo de duração uma falta pode ser do tipo permanente ou do tipo transitória. O tipo permanente está associado a problemas na estrutura física das linhas de transmissão - como queda de um ou mais condutores, queda de uma torre, contato direto dos condutores com a vegetação, entre outros - e demanda um tempo considerável para sua eliminação. Já a falta transitória não compromete a estrutura da linha, desta forma a transmissão de energia pode ser restabelecida em um tempo bem menor se comparado ao da falta permanente, caso o sistema de proteção atue corretamente.

Mesmo apresentando uma menor severidade, o estudo das faltas transitórias é essencial, visto ser este o tipo mais comum de distúrbio nas linhas de transmissão, destacando-se por sua frequência a falta monofásica transitória, como ressaltado na tabela 1.1. Do ponto de vista elétrico, esse tipo de falta pode ser entendido como um curto-circuito entre uma das fases e a terra, por onde fluirá a corrente do sistema enquanto a falta não for eliminada.

Apesar de ocorrências como queimadas e a proximidade dos cabos com a vegetação serem capazes de desencadear uma falta monofásica transitória, são as descargas elétricas atmosféricas o seu principal agente causador. Essas descargas quando atingem as linhas de

transmissão podem causar uma elevada sobretensão na linha e superar a capacidade dielétrica do ar responsável pelo isolamento entre uma das fases e a terra, rompendo tal isolamento e estabelecendo um caminho de baixa impedância para o fluxo de corrente. Nesse caminho formado, chamado de arco elétrico, o ar encontra-se ionizado (um estado instável no qual possui baixa impedância) e poderá permanecer assim por tempo indeterminado enquanto uma corrente suficientemente elevada fluir pelo caminho. Se esta corrente diminuir, chegando-se a um ponto em que esse estado instável não se sustente, o arco se extinguirá e o ar readquirirá suas características dielétricas após um pequeno período. Uma abordagem mais detalhada sobre arcos elétricos será feita adiante no capítulo 3.

2.2 MANOBRA DE ABERTURA E RELIGAMENTO MONOFÁSICO

Com a ocorrência de uma falta monofásica transitória em uma linha de transmissão o sistema de proteção deverá ser acionado visando eliminar a falta com consequente restabelecimento da operação normal da linha. Para isso a proteção agirá de forma a suprimir a corrente que flui pelo arco e o mantém ativo. Como visto na seção 1.1 basicamente duas manobras de proteção são possíveis para tal fim, a saber, a manobra de abertura e religamento trifásico e a MRM, tendo sido descritos também na citada seção as vantagens que a segunda possui no que diz respeito à estabilidade do sistema.

Durante uma MRM tradicional, a fase sob falta é detectada e aberta em seus dois terminais pelos disjuntores, permanecendo nesta situação por um tempo pré-determinado (tempo morto) e após os disjuntores fecham, havendo o religamento automático da fase. O tempo morto é definido a partir de condições de operação do sistema em estudos de regime permanente, onde, entre outros, é avaliada a estabilidade eletromecânica do sistema. Visando minimizar os efeitos nocivos da falta, ele deve assegurar uma alta probabilidade de extinção do arco dentro de um intervalo que não comprometa a estabilidade do sistema, sendo tipicamente utilizados valores entre 0,5 e 1 segundo. Uma vez definido, este tempo morto é aplicado invariavelmente na MRM, independente da falta ter sido eliminada em um tempo menor ou mesmo não ser eliminada dentro deste período. Esta última situação resulta numa atuação indesejada da MRM com o religamento feito com a fase ainda sob falta, deman-

dando uma nova atuação do sistema de proteção. A fig. 2.1 esquematiza ambas situações em uma MRM.

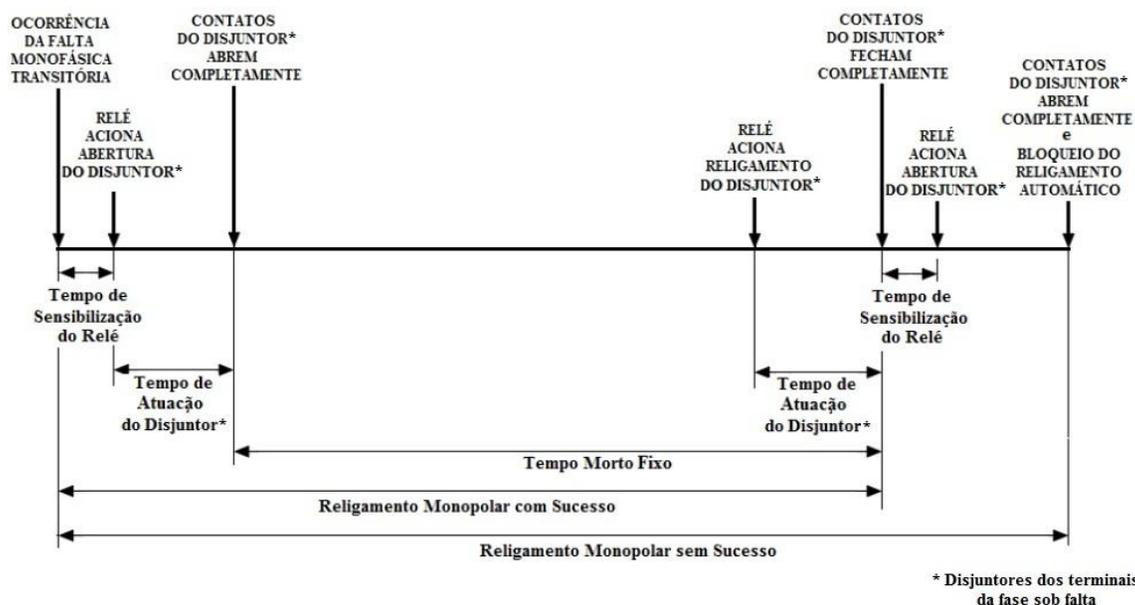


Figura 2.1: Esquema simplificado de religamento monopolar tradicional.

A extinção do arco secundário durante o tempo morto estabelecido é, portanto, crucial para o sucesso da MRM, já que somente nesta condição a fase da linha deve ser religada. A manutenção do arco secundário se dá devido a corrente que continua a fluir na fase em falta mesmo após sua abertura, que é resultante do acoplamento capacitivo e indutivo que a fase em falta possui com as fases sãs. A fração de corrente de arco secundário oriunda do acoplamento capacitivo é proporcional ao comprimento da linha e à tensão nas fases sãs [7], e no caso de linha em vazio ou em carga leve é consideravelmente maior do que o acoplamento indutivo. Um circuito equivalente simplificado de uma linha em falta durante uma MRM é mostrado na fig. 2.2.

Vários fatores influenciam o arco secundário e a sua extinção, entre os quais pode-se citar: o comprimento da linha de transmissão, ponto de ocorrência da falta ao longo da linha, nível da corrente que flui pelo arco, níveis de compensação da linha, nível de tensão da linha, distância de isolamento entre fases e fase-terra, variáveis aleatórias climáticas como o vento, umidade e temperatura, além da própria interação arco-rede nos terminais do arco. Dentre estes, o nível da corrente de arco secundário é o parâmetro mais utilizado na

literatura para considerar a probabilidade de extinção do arco dentro de um período relativamente curto, compatível com o de um tempo morto. Para as linhas de transmissão de alta e de extra alta tensão, atualmente os valores de referência apontam valores máximos de correntes de arco secundário em torno de $50 A_{ef}$ como valores indicativos de limites para uma alta probabilidade de extinção do arco secundário em um período menor que 500 ms. Apesar da ênfase dada à corrente de arco secundário, os demais fatores citados são também importantes e devem ser analisados adequadamente.

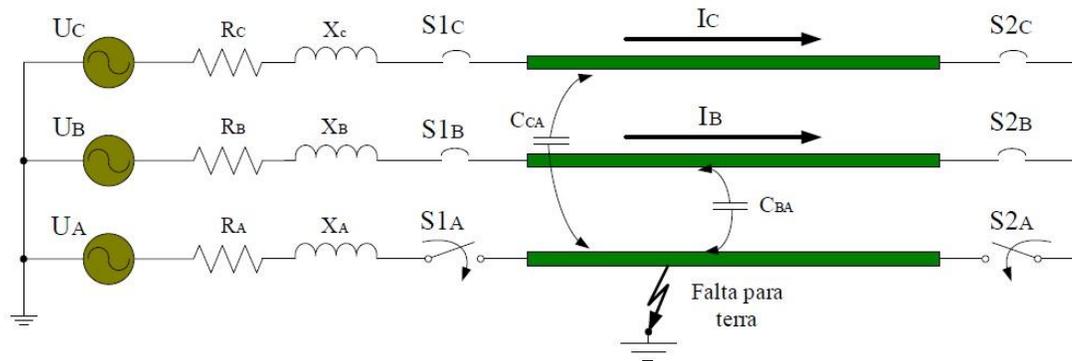


Figura 2.2: Circuito equivalente em uma manobra de religamento monofásico.

Um critério para determinar se o arco secundário se extinguirá em até 500 ms para uma determinada linha, adotado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), consiste na utilização de uma curva "Corrente de arco x Primeiro pico da tensão de restabelecimento transitório (TRT) da chave que simula a falta" obtida em laboratório (fig. 2.3, retirada de Câmara [8]). Por este critério, para que a extinção do arco secundário ocorra em até 500 ms, é necessário que tanto o último pico de corrente de arco secundário quanto o primeiro pico da TRT da chave que simula a falta em regime transitório, ao fim de um tempo de morto 500 ms, estejam dentro da zona de provável extinção do arco. Correntes maiores, acima de $100 A_{ef}$, resultam em risco considerável de não extinção do arco no período [5, 9-12]. Deve-se ressaltar que a curva da fig. 2.3 foi obtida em laboratório para um nível de tensão específico, provavelmente 440 kV (esta informação não pode ser confirmada), e os resultados não podem ser generalizados para qualquer nível de tensão, uma vez que o arco elétrico não apresenta características lineares. Desta forma a utilização indiscriminada deste critério pode ocasionar análises incorretas.

Níveis de corrente de arco secundário adequados à sua extinção são observados em linhas de transmissão curtas, nas quais a MRM pode ser adotada com alta eficiência. Já para linhas longas, a tendência é de que as correntes sejam altas suficientes para manter o arco ativo por um longo período a ponto de tornar a MRM inviável. Neste caso, para que a manobra possa ser utilizada, é necessário que alguma medida seja tomada no sentido de reduzir a corrente de arco secundário. Na seção seguinte dois métodos para se alcançar este objetivo serão descritos.

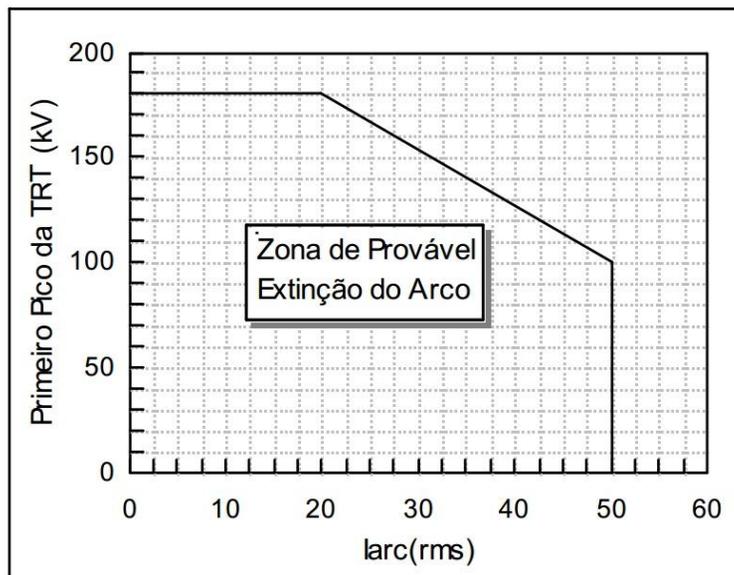


Figura 2.3: Corrente de arco x Primeiro pico da tensão de restabelecimento transitório (TRT), retirada de Câmara [8].

Por fim, mesmo com a extinção do arco secundário, é importante citar que o êxito da MRM ainda depende do valor da tensão de restabelecimento que se segue após o fenômeno. Após a extinção, o caminho ionizado pelo arco permanece com partículas residuais ionizadas e com uma alta temperatura, características que contribuem para a diminuição da capacidade dielétrica naquela região. As condições normais não demoram a serem readquiridas, mas caso a tensão de restabelecimento supere esta capacidade dielétrica durante o processo, pode haver a reinição do arco elétrico e consequente reaparecimento da falta.

2.3 MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Quando os parâmetros de uma linha de transmissão são tais que propiciam a formação de correntes de arco secundário elevadas é necessário a utilização de alguma técnica que reduza estas correntes para que a MRM possa ser empregada de forma eficiente e segura. Dois métodos tradicionais para este fim são o método do Reator de Neutro e o método das Chaves de Aterramento Rápido.

No método do Reator de Neutro a corrente de arco secundário é minimizada tentando-se neutralizar a capacitância mútua entre as fases, o que pode ser conseguido através de reatores em derivação na linha. Como a maioria das linhas EAT longas já possui um banco de reatores em derivação para reduzir o Efeito Ferranti o que o método propõe é a adição de um quarto reator corretamente dimensionado conectado entre o neutro do banco de reatores existente e a terra, conforme a fig. 2.4. Por este reator, o chamado reator de neutro (X_n), flui corrente somente durante a ocorrência de algum desequilíbrio envolvendo a terra.

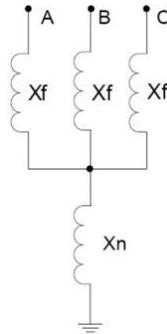


Figura 2.4: : Esquema de conexão de reatores em derivação com 4 pernas.

Escolhendo-se adequadamente a reatância X_n é possível obter uma reatância mútua que minimize ou até mesmo anule o acoplamento capacitivo entre as fases durante a falta monofásica. O fator de qualidade do reator de neutro normalmente é muito menor do que o do reator de fase (alto valor de resistência comparado com o valor da reatância do reator), o que ajuda a reduzir a corrente de arco secundário. Estudos mostraram que utilizar apenas este método é suficiente para assegurar alta probabilidade de extinção do arco secundário

para linhas de transmissão de grande porte, como por exemplo linhas de 500 kV e 900 km de comprimento [13].

No método das Chaves de Aterramento Rápido, chaves de aterramento de alta velocidade são instaladas nos terminais de cada fase da linha de transmissão como ilustrado na fig. 2.5. Quando há uma falta monofásica, após abertura dos disjuntores da fase atingida, o sistema de proteção aciona as chaves de aterramento na fase aberta. O fechamento das chaves nas extremidades da fase forma um caminho de menor impedância se comparada com a impedância do arco secundário. Ocorre então uma sensível diminuição da corrente que alimenta o arco secundário, que resulta numa elevada possibilidade de sucesso na extinção deste arco. No religamento, as chaves de alta velocidade são abertas antes do fechamento do disjuntor, restabelecendo as condições normais da linha.

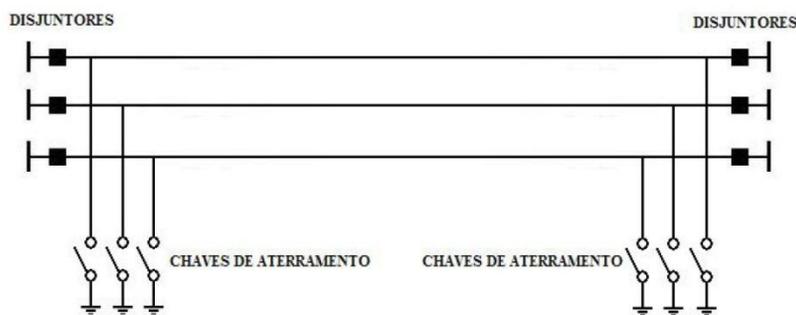


Figura 2.5: Esquema trifásico de conexão de chaves de aterramento de alta velocidade.

Este método apresenta uma grande eficiência, com o arco secundário extinguindo-se quase que instantaneamente após o fechamento das chaves [14]. Entretanto a sua implantação requer um sofisticado sistema de controle e um elevado custo. Por isso, este método é empregado principalmente quando as correntes de arco secundário são elevadas e não conseguem ser adequadamente reduzidas somente com o uso de reatores de neutro. No caso de linhas sem compensação (linhas mais curtas) onde não existe o banco de reatores para instalar o reator de neutro, as correntes de arco secundário normalmente apresentam amplitudes menores [15], pois há uma relação direta entre a amplitude da corrente de arco secundário e o comprimento da linha.

3 ARCO ELÉTRICO

3.1 FORMAÇÃO, SUSTENTAÇÃO E EXTINÇÃO DE UM ARCO ELÉTRICO

O arco elétrico é uma descarga autossustentada que ocorre em um meio ionizado de baixa impedância, capaz de suportar grandes correntes. Sua formação, portanto, depende da existência de uma diferença de potencial entre um catodo e um anodo grande o suficiente para ionizar o meio isolante que os separa.

A ionização é um processo no qual os átomos ou as substâncias são dissociados nos íons que os constituem. A presença dos íons livres são os responsáveis pela elevada condutibilidade elétrica que o meio passa a apresentar. Para os arcos elétricos estudados neste trabalho é de interesse o entendimento de como ocorre a ionização do ar, por ser este o meio isolante rompido durante as faltas monofásicas transitórias.

Quando da existência de terminais onde existe elevada diferença de potencial, alguns poucos íons e elétrons que existem naturalmente no ar são atraídos para os terminais [16]. O mesmo também ocorre com algumas partículas neutras que são polarizadas pela influência do campo elétrico presente. Esses íons durante seu deslocamento chocam-se com outras moléculas e átomos presentes no ar. A ionização ocorrerá quando a energia presente nestas colisões for suficiente para dissociar as moléculas e átomos que recebem o impacto em novos íons, e estes novos íons também terão energia suficiente para formar novos íons, possibilitando o efeito cascata necessário para a formação e manutenção de um meio ionizado.

Paralelamente, estas colisões resultam em um aumento da temperatura, permitindo que o processo de ionização térmica também aconteça. A ionização térmica ocorre quando a temperatura é elevada a tal ponto que a energia vibracional das moléculas e átomos aumenta de forma a permitir que elétrons das camadas mais externas dos átomos possam ser expulsos de suas órbitas. Quanto maior a temperatura, mais elétrons serão expulsos, intensificando a ionização.

Estas duas formas de ionização são as principais responsáveis pela formação do caminho de gás ionizado que surge entre os terminais. Este caminho possui uma distribuição praticamente neutra, ou seja, com concentrações similares de partículas positivas e negativas, as quais possuem um comportamento coletivo, o que resulta no estado de matéria conhecido como plasma. Se algum desequilíbrio entre as densidades de carga surgir, forças eletrostáticas atuarão rapidamente de forma a restaurar a condição de neutralidade. O plasma apresenta alta condutividade elétrica, favorecendo a presença de altas correntes elétricas durante a vigência de um arco elétrico [17].

Simultaneamente ao processo de ionização ocorre o fenômeno de recombinação, que justamente faz o papel oposto da ionização ao provocar a diminuição das partículas ionizadas com formação de átomos e moléculas neutros. Para que haja a recombinação é necessário que as partículas iônicas combinantes fiquem próximas por tempo suficiente. Assim a recombinação ocorre com mais facilidade nas temperaturas mais baixas e sob pressões maiores, onde a agitação é menor, e quando há presença elevada de íons no meio, o que aumenta a probabilidade de haver partículas combinantes próximas. A interação entre o processo de ionização e de recombinação culmina em um equilíbrio dinâmico que acompanhará o arco durante a sua existência.

Desta forma, para a sustentação de um arco elétrico é necessário que lhe seja fornecida energia suficiente para manter o fenômeno de ionização maior, ou ao menos em equilíbrio, com o fenômeno de recombinação, e que esta energia seja também capaz de suprir as perdas de energia que são cedidas ao meio externo.

As perdas de energia ao meio externo são principalmente devido aos fenômenos de condução, convecção e radiação. A condução é a maior responsável pela perda de energia do arco elétrico ao meio externo [18], ocorre na forma de calor, resultante da movimentação das partículas eletricamente carregadas na superfície do arco que se chocam as partículas ao redor. O efeito da convecção contribui para o deslocamento da coluna do plasma pelo ambiente, ou seja, para o alongamento do arco, o que aumenta a área superficial do arco, intensificando os efeitos do fenômeno de condução. As perdas por radiação são devidas a fenômenos como o de radiação contínua e de mudanças espectrais de banda e linha.

Quando ocorre alguma alteração que influencie no complexo equilíbrio energético formado, como, por exemplo, mudança da intensidade da corrente que flui pelo caminho

ionizado, o arco se ajustará a um novo estado de equilíbrio ou, na impossibilidade deste, se extinguirá. A fig. 3.1 exemplifica o desenvolvimento de um arco elétrico desde sua ignição até a sua extinção. Este arco foi gerado em ensaio de campo que será devidamente abordado no capítulo 4. No caso deste arco experimental a sua extinção decorre do fato da tensão imposta aos terminais do arco ter sido suprimida (a fonte é desligada), distinguindo-o do que ocorre num arco real.

A extinção do arco elétrico se caracteriza pela transformação do plasma condutor em um meio isolante capaz de suportar a tensão imposta pelos eletrodos que determinavam os terminais do arco. Em outras palavras, a extinção do arco elétrico ocorre quando o ar ionizado readquire suas características dielétricas e a corrente que fluía pelo caminho ionizado formado pelo arco cessa de forma definitiva.

Para que a extinção de um arco elétrico ativo ocorra é necessário que a energia recebida por ele não seja capaz de sustentar um mínimo de ionização do meio para sua manutenção. No caso dos arcos elétricos em linhas de transmissão de corrente alternada, esta situação acontecerá a cada meio ciclo, quando da passagem pelo zero da corrente que alimenta o arco.

Entretanto, o fato do valor da corrente de arco passar por zero em um determinado instante não é suficiente para assegurar a extinção do arco. Para a extinção ser concretizada é necessário que o meio se regenere dielectricamente para resistir à tensão da rede que voltará a ser imposta sobre os terminais do arco durante o próximo ciclo. Caso a tensão transitória de restabelecimento que surge logo após a extinção do arco seja maior do que a suportabilidade dielétrica do meio em reestruturação em algum momento haverá reignição do arco elétrico.

Cabe salientar aqui que após a extinção do arco há temporariamente um canal de elevada temperatura e com resquícios de partículas ionizadas que dificultam o restabelecimento das características dielétricas do ar e favorecem a reignição do arco elétrico. Este canal pode ser notado nos dois últimos quadros da fig. 3.1, e será mais efetivo quanto maior a corrente que fluía pelo arco antes da extinção. Este é um dos motivos pelo qual os arcos elétricos de correntes elevadas podem durar um grande tempo, ou até mesmo não se extinguem naturalmente. O canal extingue-se gradativamente à medida que se esfria e suas partículas ionizadas são eliminadas.

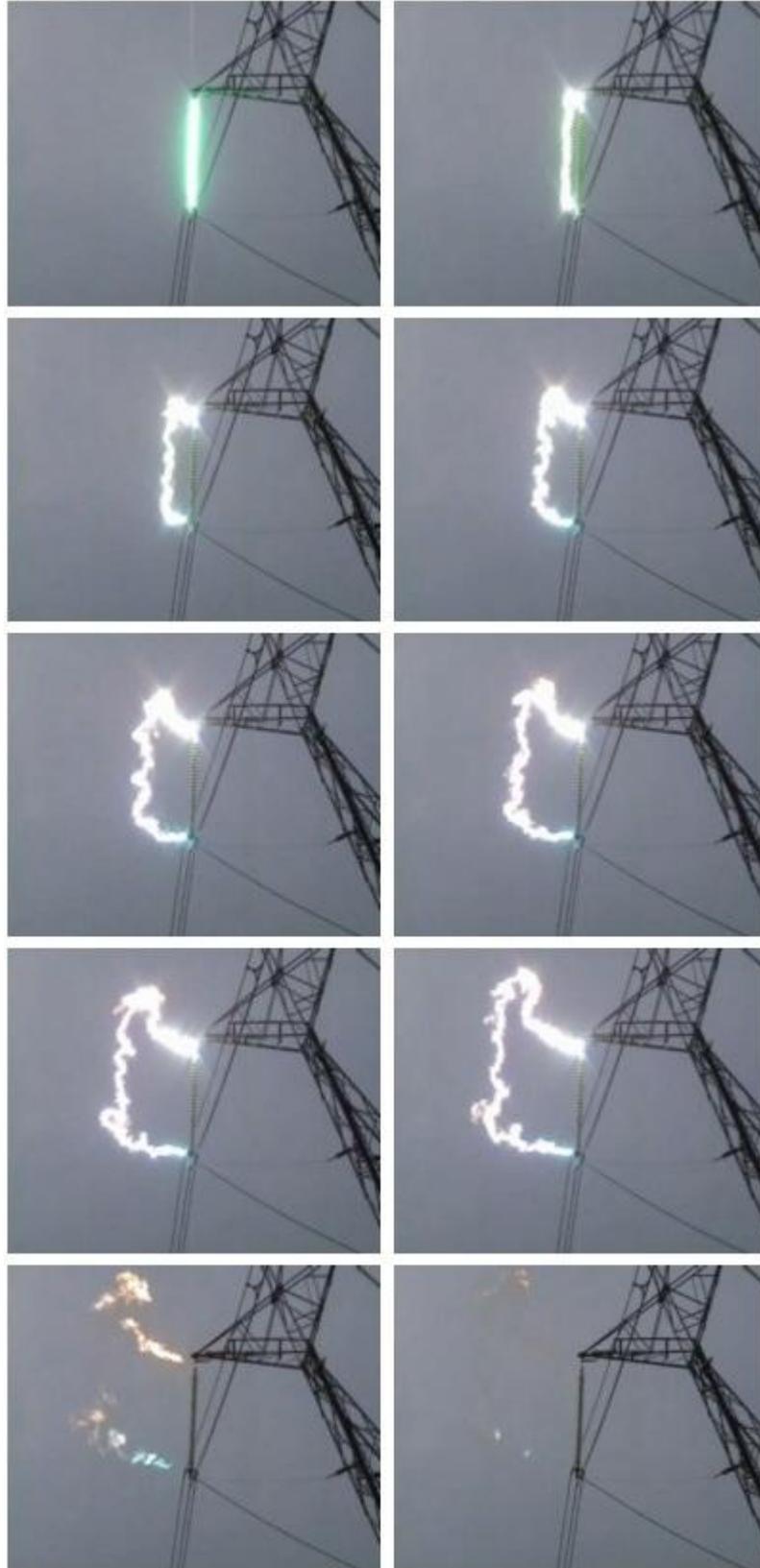


Figura 3.1: Desenvolvimento de um arco elétrico experimental no ar.

Durante o processo de extinção do arco há então, a cada passagem por zero da corrente, uma verdadeira corrida entre a capacidade de restabelecimento dielétrico do meio e o aumento da TTR. Toda vez que a TTR supera a capacidade dielétrica, há a reignição do arco que buscará então seu equilíbrio para as condições que lhe são impostas. Até a extinção definitiva muitas reignições podem ocorrer, e se estas reignições ocorrerem quando a tensão já se encontrar em um alto valor absoluto, pulsos elevados de corrente poderão afligir ao arco, alterando substancialmente suas características elétricas caracterizando um estado de instabilidade deste arco [19]. A fig. 3.2, retirada de Prikler [19], ilustra esta situação para um arco secundário gerado em um ensaio em uma linha de 400 kV, onde um pouco após 0.9 s os pulsos de corrente se iniciam, alterando o padrão das curvas de tensão e corrente que ocorria até então. O arco se extingue definitivamente apenas em torno de 1,15 s.

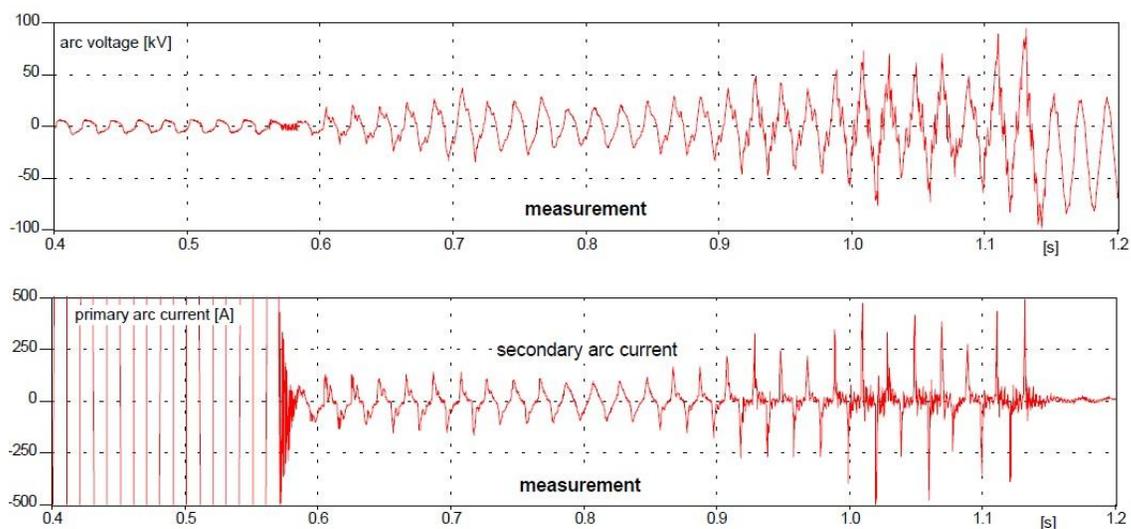


Figura 3.2: Curvas de tensão e corrente para um ensaio de arco elétrico em linha de 400 kV, retirada de Prikler [19].

3.2 MODELAGEM DO ARCO ELÉTRICO

Um modelo matemático é uma representação ou interpretação simplificada da realidade, ou uma interpretação de um fragmento de um sistema, segundo uma estrutura de conceitos mentais ou experimentais. Dessa forma, também pode ser definido como o resultado do processo de produzir uma representação abstrata, conceitual, gráfica ou visual,

de fenômenos, sistemas ou processos com o propósito de analisar, descrever, explicar, simular, explorar, controlar e prever estes fenômenos ou processos. Eles facilitam e norteiam a compreensão dos fenômenos naturais [20].

No caso do arco elétrico, sua modelagem é de especial interesse para a compreensão de diversos fenômenos. Uma de suas aplicações estaria no estudo da MRM, objetivo fim dos resultados deste trabalho, onde um modelo de arco elétrico é necessário, uma vez que o sucesso da manobra está intimamente ligado à interação que ocorre entre o arco elétrico que se forma com o curto-circuito monofásico e a rede, desde sua ignição como arco primário até sua extinção já como arco secundário. Em especial, métodos avançados que aperfeiçoem a utilização da MRM em sistemas de proteção demandam um modelo robusto de arco elétrico secundário.

Normalmente, para estudar um determinado fenômeno complexo como o caso do arco elétrico, criam-se vários modelos. Assim a modelagem do arco pode ser classificada de acordo com o tipo de abordagem adotada para a representação dos fenômenos. Um bom modelo é aquele que representa os diversos aspectos do fenômeno da maneira mais simples e eficaz possível, sem descartar informações relevantes, mas, via de regra, a precisão de um modelo está fortemente associada à sua complexidade. Com relação aos tipos de abordagem de um modelo pode-se destacar:

→ modelos empíricos: fornecem relações analíticas ou gráficas que descrevem correlações entre parâmetros dos circuitos. Podem ser obtidos a partir de testes experimentais ou derivados de cálculos com modelos físicos e modelos do tipo caixa-preta. Estes modelos costumam ser mais específicos e não fornecem resultados satisfatórios quando aplicados em situações que difiram do cenário original estudado.

→ modelos físicos: incluem os fenômenos físico do arco em detalhe. O comportamento do arco é calculado com base nas leis da conservação de massa, energia e momento, com as quais são definidas as propriedades do plasma, do gás, etc. As equações a serem resolvidas são em sua maioria complexas e assumem a forma de equações diferenciais parciais não lineares. Em geral possuem respostas precisas, mas necessitam de parâmetros difíceis de se obter na prática.

→ modelos tipo caixa-preta: consideram o arco como um bipolo representável por uma função de transferência. Apresentam as relações entre entrada e saída sem levar em conta as

causas e consequências das variações dos parâmetros. São os modelos mais simples e, por isso, mais utilizados a nível operacional.

→ modelos tipo caixa-cinza: incorporam o conhecimento físico que se tem sobre o sistema, mas possui parâmetros que são definidos a partir de dados estatísticos de análises empíricas. Procuram dar uma resposta mais precisa do que os modelos caixa-preta. O principal problema desses modelos é que os dados que se recolhe do sistema em estudo raramente são suficientes para uma identificação confiável de todos os parâmetros, associando incerteza ao modelo.

A escolha das hipóteses simplificadoras e do tipo de modelo é fundamental para a validade dos resultados obtidos. A aplicação de cada uma destas metodologias não é excludente, ou seja, um determinado modelo pode servir de referência para outro. A maioria dos modelos caixa-preta, por exemplo, baseia-se nas equações originais desenvolvidas por Cassie e Mayr, com modificações sendo introduzidas por diversos autores no decorrer dos anos numa tentativa de melhor representar o comportamento dos arcos. O exposto pode ser facilmente notado na tabela 3.1, retirada de Dupont [21], que traz alguns exemplos de modelos caixa-preta, que são devidamente abordados pela referência.

Mesmo com os inúmeros progressos feitos com relação à modelagem, ainda não se tem um modelo único de arco que reproduza razoavelmente o seu comportamento. Os vários modelos existentes possuem simplificações e aproximações que podem ser válidas para a aplicação específica para a qual foram criados, mas que acarretam em imprecisões do comportamento real do arco como um todo. Desta forma, não há ainda um modelo adequado que represente o arco secundário para um estudo de MRM, uma vez que seu comportamento é muito complexo, influenciado por vários parâmetros conforme citado na seção 2.2.

Portanto, uma fiel modelagem deve ser desenvolvida a partir de extensa gama de parâmetros. O modelo deve ter a capacidade de interagir com vários elementos do sistema, mantendo coerência de representação dos domínios de estudo no que se refere às diversas condições possíveis de operação e análise do sistema elétrico (regimes permanentes e/ou transitórios, domínios do tempo e/ou frequência). Na modelagem de todos os equipamentos do sistema, deve-se considerar por exemplo, que seus parâmetros representem corretamente variações de frequência de até 10 MHz, uma vez que existem fenômenos de arcos elétricos com constantes de tempo da ordem de 10 μ s [22].

Tabela 3.1: Modelos de arcos elétricos do tipo caixa-preta, extraída de Dupont [21]

Modelo	Equação do Modelo	Parâmetros
Cassie	$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\theta_c} \left[\left(\frac{u_a}{U_0} \right)^2 - 1 \right]$	$\theta_c = cte$ $U_0 = cte$
Mayr	$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\theta_m} \left[\left(\frac{u_a \cdot i_a}{P_0} \right) - 1 \right]$	$\theta_m = cte$ $P_0 = cte$
Mayr Expandido	$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\theta_e} \left[\left(\frac{u_a \cdot i_a}{A_e + d_e \cdot i_a } \right) - 1 \right]$	$\theta_e = cte$ $A_e, d_e = cte$
Schwarz	$\frac{dg}{dt} = \frac{g}{\theta_{(g)}} \left[\left(\frac{u_a \cdot i_a}{P_{o(g)}} \right) - 1 \right]$	$\theta_{(g)} = A \cdot g^\alpha$ $P_{o(g)} = B \cdot g^\beta$ $A = cte \quad B = cte$
Mayr Composto	$\frac{dg_1}{dt} = \frac{g_1}{\theta_1} \left[\left(\frac{u_1 \cdot i_a}{P_{o1}} \right) - 1 \right]$ $\frac{dg_2}{dt} = \frac{g_2}{\theta_2} \left[\left(\frac{u_2 \cdot i_a}{P_{o2}} \right) - 1 \right]$	$\theta_1, \theta_2 = cte$ $P_{o1} = \xi \cdot P_0$ $P_{o2} = (1 - \xi) \cdot P_0$ $\xi = cte$
Hochrainer	$\frac{dg}{dt} = \frac{G_e(i_a) - g}{\tau_{(g)}}$	$G_e(i_a) = C_1 \cdot i_a ^{C_2}$ $\tau_{(g)} = \tau_1 \cdot g^{\tau_2}$
Mayr Portela	$\frac{dg_1}{dt} = \frac{g_1}{\theta_{1p}} \left[\left(\frac{u_1 \cdot i_a}{P_{o1}} \right) - 1 + \frac{\eta \cdot \varphi}{\xi} \right]$ $\frac{dg_2}{dt} = \frac{g_2}{\theta_{2p}} \left[\left(\frac{u_2 \cdot i_a}{P_{o2}} \right) - 1 - \frac{\eta \cdot \varphi}{1 - \xi} \right]$ $\eta = \ln \left[\varepsilon \frac{g_2}{g_1} \right]$	$\theta_{1p}, \theta_{2p} = cte$ $\varphi = \frac{J}{P_o} = cte$ $P_{o1} = \xi \cdot P_0$ $P_{o2} = (1 - \xi) \cdot P_0$ $\varepsilon = \frac{(1 - \xi)}{\xi}$ $\xi = cte$

Onde g = condutância; θ_x = constante de tempo térmica; U_x = tensão de arco no momento x ; i_x = corrente de arco no instante x ; P = potência dissipada no arco elétrico; τ = período de tempo durante o qual g evolui dinamicamente.

O modelo almejado pelo projeto de pesquisa citado no capítulo 1 permitirá projetar de forma mais confiável a operação de religamento monofásico, que se segue à abertura de linha, realizada automaticamente após a ocorrência de defeitos monofásicos na rede de transmissão. Este modelo em desenvolvimento leva em consideração os aspectos mencionados nesta seção, incluindo os efeitos de interação com o sistema elétrico.

3.3 O ARCO ELÉTRICO LONGO NO AR

A grande parte dos estudos até hoje feita acerca dos arcos elétricos, e por consequência dos resultados disponíveis na literatura, visam à compreensão do fenômeno durante as manobras de disjuntores. Neste caso, geralmente, o arco elétrico possui dimensões reduzidas e ocorre em local e ambiente conhecido, possibilitando ainda o emprego de diversos artifícios que favoreçam a sua extinção, como a escolha do meio em que ele surgirá, mudanças no fluxo do gás, controle de temperatura e pressão, entre outros.

Assim, os resultados obtidos, bem como as técnicas que são aplicáveis para a extinção do arco elétrico em disjuntores, não são válidos para os arcos elétricos longos que se formam no ar, característicos das faltas monofásicas transitórias, e dos quais o arco secundário é um exemplo típico. Estes arcos necessariamente:

- têm o ar ionizado como seu meio condutor;
- possuem um comprimento grande o suficiente a tornar os efeitos da região anódica e da região catódica desprezíveis em relação aos efeitos da coluna;
- estão sujeitos a qualquer influência externa do clima e do meio em si;
- devido à sua aleatoriedade, não é possível o emprego de técnicas que favoreçam a sua extinção diretamente no local de ocorrência.

A interação arco-rede e as condições climáticas são os principais fatores que determinam de que forma um arco elétrico longo se desenvolve durante sua existência, e seu alongamento é de extrema importância para a definição do tempo necessário para a sua extinção.

Os estudos encontrados na literatura referentes a arcos elétricos longos no ar, quase que na sua totalidade o fazem na busca de um melhor entendimento para o arco secundário durante manobras de proteção, com grande utilização de testes experimentais. Na sequência são apresentados alguns destes trabalhos.

Em [23] o autor procura avaliar a influência do arco em relés de impedância. Realiza testes de laboratório nos quais a corrente de arco varia entre 135 e 960 A, e o comprimento do arco varia dentre os ensaios de 1,2 a 12 m. Com os resultados experimentais afirma que a tensão entre os terminais do arco, em um caso de condição estável de balanço de calor, com ausência de vento e com geração constante, pode ser calculada por (1), esti-

mando os valores parâmetros em $k = 8750$ e $n = 2,5$, para o comprimento L medido em pés.

$$V_{arco} = \frac{kL}{\sqrt[n]{I}} \quad (1)$$

Em [24] são estudadas as características de arcos elétricos de 3 cm a 1,22 m gerados em laboratório, com picos de corrente de 68 a 21.750 A em 60 Hz. Conclui-se que o gradiente de tensão é pouco afetado pela magnitude da corrente, com todos os gradientes ficando entre 846 e 1968 V/m, com um média de 1338 V/m.

Em [25] são apresentados três métodos para aferir se uma falta monofásica é permanente ou transitória. Nos casos apenas a fase em falta é aberta pelo sistema de proteção, e analisando-se a tensão nos terminais desta fase é possível distinguir o tipo de falta. É relatado que um protótipo do dispositivo foi implementado e colocado em teste em uma linha 330 kV, 60 km na China, com resultados satisfatórios.

Em [26] é feito um estudo dos efeitos do arco secundário em um sistema de transmissão híbrido CA/CC (corrente alternada – corrente contínua). Utiliza-se uma simplificação do modelo de arco secundário feita por A.T. Johns modelada em EMTP. São pesquisados os fatores que afetam a duração do arco secundário em condições de equilíbrio e desequilíbrio para o circuito CA.

Em [27] o autor visa aprimorar a modelagem de arcos elétricos longos anteriormente formulada por ele, com ênfase para a determinação dos parâmetros presentes nos modelos. Através de análises empíricas e resultados obtidos na literatura, são apresentados os modelos para os arcos primário e secundário, com todos os parâmetros estimados. Apresenta ainda uma expressão, obtida empiricamente, que representa a tensão característica de reignição do arco. Através de simulações feitas em EMTP destaca a maior precisão dos modelos apresentados quando comparados com modelagens anteriores.

Em [28] o estudo trata também da questão de se evitar que o religamento automático ocorra em uma falta permanente. Um algoritmo é desenvolvido mediante a possibilidade de se identificar o arco secundário a partir de distorções que este causa nos sinais de tensão e corrente nos terminais da linha de transmissão, decidindo se a falta é permanente ou não a partir de cálculos que levam em consideração o espectro harmônico da amplitude de tensão dos arcos elétricos. Apresenta (fig. 3.3) um espectro harmônico de tensão de um arco elétrico, enfatizando que os arcos longos no ar possuem este espectro característico. Nota-se pela

fig. 3.3 uma relação entre a harmônica de tensão de 3ª ordem e a de 1ª ordem em torno de 27 %, entre a de 5ª ordem e a de 1ª ordem uma relação de cerca de 20 % e entre a de 7ª ordem e a de 1ª ordem de 15 %. Não são fornecidos detalhes acerca dos ensaios realizados, tampouco é feita uma análise da variação do conteúdo de frequência com o tempo. É proposto pelo autor que o arco elétrico seja modelado como uma onda quadrada - que possui, segundo o autor, um espectro harmônico similar ao apresentado pelo arco elétrico real, mostrado também pela fig. 3.3 - com seu valor de pico resultante do produto do gradiente de tensão (valores entre 12 e 15 kV/m) e o comprimento do arco. O comprimento é definido como a distância entre os eletrodos e não leva em consideração a questão do alongamento do arco elétrico durante a falta.

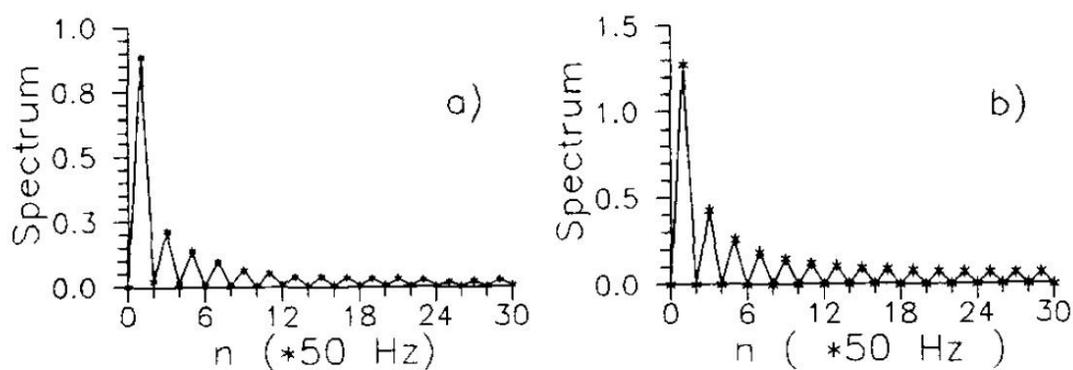


Figure 3: Arc voltage amplitude spectra: a) actual and b) square waveforms

Figura 3.3: Espectro harmônico da tensão de um arco elétrico, extraído de Djuric [28].

No capítulo 5 são apresentados os valores obtidos na presente pesquisa. Os valores para o percentual de 3ª harmônica apresentados na referência são semelhantes aos obtidos nesta pesquisa, mas os das harmônicas superiores são muito maiores, indicando que a onda de tensão não pode ser adequadamente representada por uma onda quadrada, como sugerido na referência [28].

Em [29] são feitos ensaios em uma célula de teste fechada, com os eletrodos dispostos verticalmente, de arcos elétricos de 5 a 50 kA. Pelos dados obtidos afirma-se que para esta faixa de corrente o gradiente de tensão pode ser aproximado por (2). O alongamento do arco durante o ensaio não é considerado nos cálculos pelos autores, este é considerado fixo

e com comprimento igual à distância entre os eletrodos. É apresentado um modelo para o arco.

$$E = 0,95 + \frac{0,005}{l} \text{ kV/m} \quad (2)$$

Em [30] afirma-se que registros de testes de MRM mostram que o arco secundário apresenta uma característica intermitente durante um período significativo e que a extinção do arco elétrico secundário é sempre precedida de um período intermitente, contendo impulsos de corrente. Destaca-se que o fenômeno de ondas viajantes que surge nesse período intermitente tem um efeito determinante na duração do arco. Fazem-se também considerações sobre as técnicas utilizadas para representar arcos secundários em ensaios, entre elas afirmam que os arcos que possuem sua ignição através de um fio fusível apresentam tempos de extinção menores do que os arcos em condições naturais, especialmente quando há influência de ventos fortes. Por fim, algumas considerações sobre a influência do vento no arco elétrico são feitas.

Em [19] os parâmetros do modelo de arco proposto são extraídos das medidas obtidas em testes feitos em uma linha de 230 km, circuito duplo, 400 kV e sem compensação em derivação. Durante o trabalho uma ênfase grande é dada ao período seguinte à fase de estabilidade do arco, caracterizado pela reignição sucessiva do arco e com impulsos de corrente de grande amplitude, muito maiores do que o valor de pico da corrente em regime permanente. Durante os testes os arcos se extinguiram entre 0,05 e 4 s. A extinção, quando na presença de ventos moderados (3 a 4 m/s), ocorreu entre 0,05 e 0,69 s. O modelo proposto é simulado em EMTP-ATP apresentando resposta satisfatória. Para esta simulação é feita uma estimativa rudimentar da variação do comprimento do arco, que inicia com 4 m e se extingue com 32 m após 1,1 s.

Em [31] o autor discute a validade da fórmula (1) apresentada por Warrington [23] e dos valores apresentados para seus parâmetros. Conclui que os valores dos parâmetros não são coerentes e sugere novos valores a partir de dados mais recentes da literatura. Faz uma comparação entre os resultados que corroboram com os novos valores apresentados.

4 ENSAIOS DE ARCO ELÉTRICO

A base de dados utilizada nesta pesquisa é proveniente dos ensaios realizados na unidade de Adrianópolis dos laboratórios do CEPEL no período de 2004 a 2010, especificamente a parte experimental da pesquisa de P&D de ELETROBRÁS/FURNAS: "Modelagem de Arco Elétrico para Estudo de Religamento Monopolar". Até o momento da elaboração desta dissertação, o projeto assim como novos ensaios continuam em execução. Isto se deve ao grande número de ensaios que estão sendo realizados, que visam cobrir a enorme gama de condições de formação de um arco elétrico numa linha de transmissão, além da variabilidade de parâmetros experimentais testados a cada ensaio.

Visando que os ensaios ocorressem em condições que representassem com fidelidade o ambiente real do objeto em estudo, foi instalado dentro da unidade do CEPEL um trecho experimental de uma linha de transmissão de 500 kV, que simula as condições das linhas de transmissões reais. O trecho, como representado na fig. 4.1, é formado por três torres de transmissão, sendo uma de ancoragem entre duas de suspensão, e todos demais elementos como cadeias de isoladores, anéis de blindagem, cabos condutores e para-raios.

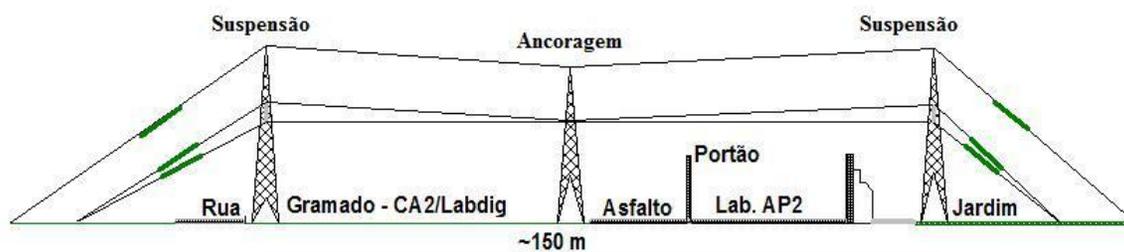


Figura 4.1: Estrutura das torres 500 kV dos ensaios.

Os arcos elétricos são gerados rompendo-se o isolamento entre uma das fases desse trecho experimental de linha e a terra. O arco forma-se entre o ponto superior da cadeia de isoladores, conectado na torre de transmissão, que é aterrada, e o ponto inferior da cadeia, conectado à fase, na qual é aplicada uma corrente sustentada senoidal durante 1 segundo, mantendo o arco elétrico ativo por este período.

A corrente mantida durante o ensaio é oriunda de uma fonte externa, acoplado à cadeia de isoladores da fase na qual a falta é simulada. Esta fonte foi desenvolvida pelo CEPEL para o projeto de pesquisa citado e aprimorada ao decorrer dos ensaios. A fig. 4.2 mostra o circuito elétrico desta fonte, que tem como principais elementos: transformadores monofásicos (T1) conectados em série e ligados no barramento de uma subestação de 138 kV, os quais impõem tensões de até $50 \text{ kV}_{\text{ef}}$; transformador elevador (T2) empregado para se atingir tensões de até $250 \text{ kV}_{\text{ef}}$; disjuntores (D), chaves seccionadoras (S) e chaves síncronas (CS) para controlar os chaveamentos e sincronizar o ângulo da fase da corrente; reatores (X) e um resistor (R) com o objetivo de limitar a corrente; divisores de tensão (DT1 e DT2) para medir a tensão nas extremidades do arco em relação à terra e um transformador de corrente (TC) para medir a corrente sustentada do arco. Para cada diferente nível de corrente que é imposto ao arco durante um ensaio estes equipamentos necessitam ser previamente calibrados e testados.

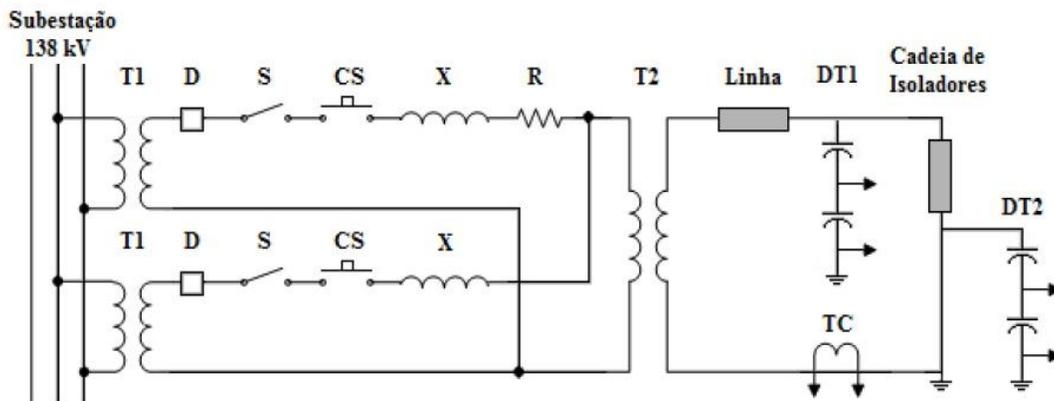


Figura 4.2: Representação esquemática do circuito elétrico empregado para a geração da corrente sustentada do arco.

Com o uso desta fonte externa procura-se manter o valor eficaz da corrente constante durante todo o ensaio (1 segundo). Entretanto esta condição ideal é muito difícil de se alcançar experimentalmente, e mesmo com os grandes esforços operacionais implementados visando este objetivo variações na corrente de arco são observadas. Em especial os ensaios envolvendo níveis de corrente mais baixos são mais difíceis de terem os valores eficazes das suas correntes mantidos constantes, que nos casos mais severos chegam a apresentar uma variação de até 15% no valor da corrente eficaz no decorrer do ensaio.

Vários níveis de corrente de arco elétrico foram aplicados nos diversos ensaios realizados durante estes anos de projeto. Destes, no presente trabalho serão analisados ensaios com níveis de corrente sustentada de $15 A_{ef}$, $20 A_{ef}$, $30 A_{ef}$, $50 A_{ef}$, $60 A_{ef}$, $100 A_{ef}$, $150 A_{ef}$, $200 A_{ef}$, $300 A_{ef}$, $500 A_{ef}$, $1.000 A_{ef}$, $3.000 A_{ef}$, $5.000 A_{ef}$ e $10.000 A_{ef}$. Esta faixa de valores cobre com folga todos os níveis de correntes que podem acometer um arco secundário. Incluem-se até mesmo os arcos que poderiam advir de formas menos convencionais de linhas de transmissão, como, por exemplo, das linhas utilizadas para uma possível transmissão em meio comprimento de onda (com linhas de aproximadamente 2.500 km), que podem atingir valores em torno de $1.000 - 2.000 A_{ef}$.

Durante o ensaio, a formação do arco ocorre na cadeia de isoladores, que possui comprimento de 4,05 m, e se dá através do artifício de fixar um fio fusível antes da aplicação do sinal da corrente sustentada. O fio é conectado entre o topo do isolador superior e a parte inferior do condutor mais inferior da cadeia de isoladores, o que facilita a ruptura dielétrica do ar, com a conseqüente ignição do arco elétrico. Esse fio vaporiza-se com a passagem da corrente. A fig. 4.3, proveniente de um dos ensaios analisados, ilustra esta situação. Diferentes materiais foram empregados para confecção deste fio fusível, mas na grande maioria e em todos os ensaios mais recentes, empregou-se o fio de manganina, um tipo de liga formada por cobre, níquel e manganês na proporção de 86 %, 2 % e 12 %, respectivamente.

O uso desse artifício acarreta, porém, em uma indesejável presença de metal vaporizado em meio ao arco elétrico, que pode contaminar o plasma resultante por um intervalo de poucos décimos de segundo. Neste período inicial as almejadas características elétricas do arco livre no ar estão alteradas devido à influência do metal vaporizado, e o arco do ensaio efetivamente representará um arco similar ao real apenas após a eliminação desta e de outras influências que possam surgir, como, por exemplo, o contato direto do arco com a cadeia de isoladores.

Durante os ensaios apenas a fase onde a falta é simulada está energizada, as demais fases não são diretamente conectadas a nenhuma fonte de energia. Assim, a fim de representar o arco secundário presente durante a MRM, será considerado que o sinal de corrente senoidal sustentada gerado simula os efeitos que ocorreriam com o acoplamento existente entre as fases de uma linha real.



Figura 4.3: Formação de arco em ensaio do CEPEL.

Há também, no decorrer do ensaio, a geração de alguns impulsos de corrente. Em todos os ensaios analisados esses impulsos ocorreram após 500 ms da ignição, para que o arco elétrico já estivesse com suas condições elétricas estabilizadas no momento da geração dos impulsos. A verificação da influência destes impulsos é fundamental para a caracterização da resposta dinâmica do arco, importante parâmetro para a modelagem geral do arco, mas que está fora do escopo deste trabalho.

As amostras dos ensaios são adquiridas e armazenadas por um sistema também desenvolvido pelo CEPEL. Este sistema de aquisição está em constante desenvolvimento e atualmente é capaz de processar $2 \cdot 10^7$ amostras por segundo através de 4 canais independentes, que registram a tensão na parte superior e inferior do arco, a corrente sustentada e a corrente de impulso.

As condições climáticas no momento do ensaio também são registradas através de uma estação meteorológica, na qual se obtêm os valores de temperatura, umidade, pressão e da velocidade do vento. Este último tem grande influência para o alongamento do arco elétrico e, conseqüentemente, para estudar o fenômeno da extinção do arco secundário. O sistema de aquisição de registros da variação do vento passou por grande desenvolvimento no decorrer do projeto. Os ensaios mais recentes possuem registro da direção do vento em três

dimensões e são coletados a uma taxa suficiente a permitir uma análise mais adequada da variação do vento presente durante o ensaio.

Filmagens e fotografias dos ensaios também são efetuadas. A princípio as filmagens eram obtidas a partir de dois pontos de observação, empregando câmeras com taxa de 30 quadros por segundo, conforme mostrado na fig. 4.4. Mais recentemente, câmeras de alta velocidade capazes de operar a uma taxa de até 2000 quadros por segundo foram adquiridas, sofisticando o registro visual. Essas imagens são fundamentais para associar o desenvolvimento espacial do arco ao comportamento das variáveis elétricas coletadas.

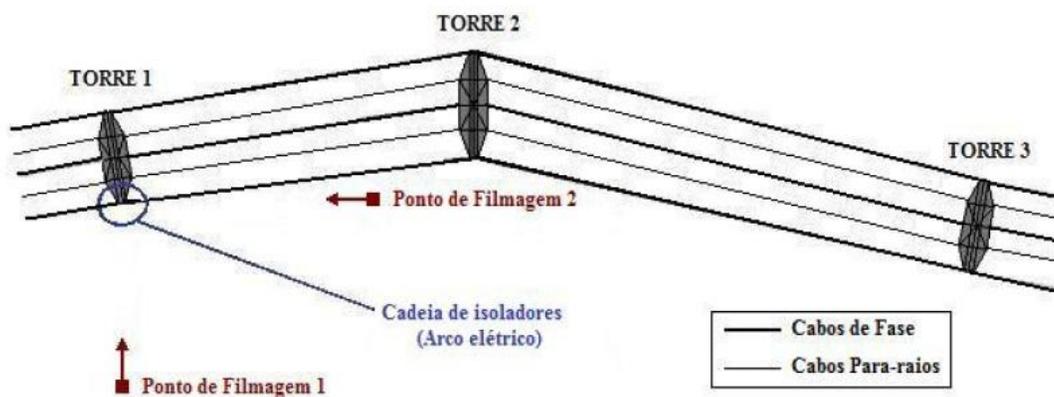


Figura 4.4: Esboço da disposição das estruturas de ensaio (vista superior)

5 CONTEÚDO HARMÔNICO

5.1 TRATAMENTO NUMÉRICO INICIAL

Todos os dados coletados durante o ensaio são importantes para definir o grande número de parâmetros necessários para uma fiel modelagem do arco elétrico secundário, objetivo maior do projeto em andamento. Para este trabalho, entretanto, foram de interesse as medidas elétricas efetuadas de tensão e corrente no arco elétrico e os registros visuais feitos. Nenhuma análise que relacione os resultados deste trabalho com os dados climáticos disponíveis foi feita até o momento. Destaca-se aqui a ausência de uma análise da influência do vento durante o desenvolvimento do arco elétrico, em especial no que tange a sua variação de comprimento. Isso se deve principalmente ao fato de que inicialmente as amostras relativas ao vento foram adquiridas em uma taxa de amostragem pequena, taxa esta que não permite inferir corretamente como é de fato o vento presente durante o segundo em que o ensaio ocorre. Como dito na seção anterior, os ensaios mais recentes já possuem um registro mais apurado e a uma taxa suficiente a permitir uma análise precisa da variação do vento, o que permitirá, no futuro, o estudo da sua influência no arco elétrico.

As medidas dos sinais elétricos foram registradas em quatro vetores unidimensionais distintos, sendo um relativo à corrente sustentada no arco, um à tensão de anodo, outro à tensão de catodo e por fim um ao impulso. Devido ao enorme número de amostras, cada um desses quatro vetores foi dividido em 20 arquivos.

O tratamento inicial objetivou unificar os arquivos e analisar a consistência dos dados recebidos. Para isso foram plotados para todos os ensaios as curvas de tensão entre os terminais do arco (tensão de anodo menos a tensão do catodo) e corrente e verificadas características como coerência de fase entre os sinais, presença de ruídos e duração do ensaio, sendo eliminados ou, quando possível, corrigidos os ensaios que apresentaram problemas nessa triagem. A fig. 5.1 mostra, como exemplo, o gráfico gerado nesta etapa das curvas de corrente e tensão de um ensaio válido classe 200 A_{ef}. Um maior detalhe destas curvas em dois períodos distintos, no início e outro próximo ao final do ensaio, pode ser visto nas fig. 5.2 e 5.3. Figuras referentes a ensaios de outras classes de corrente estão no Apêndice A.

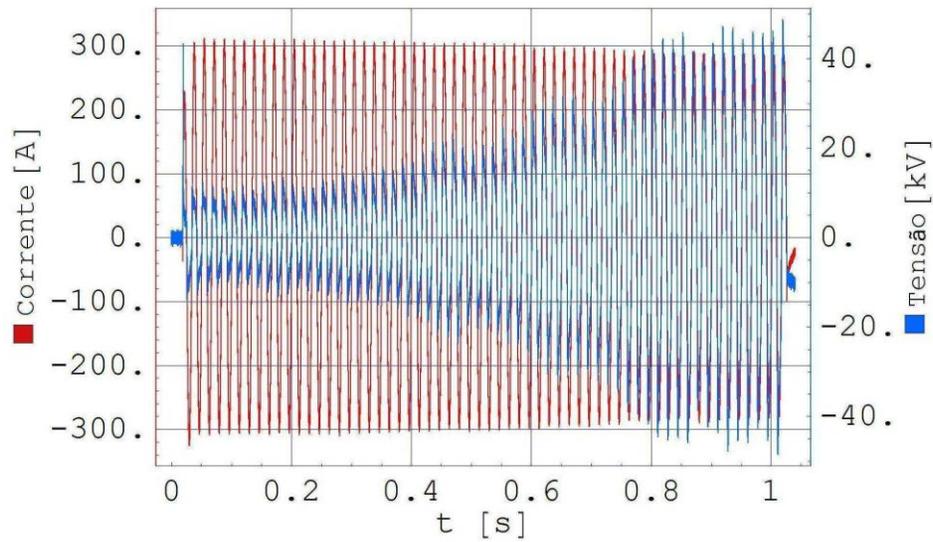


Figura 5.1: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A_{ef} .

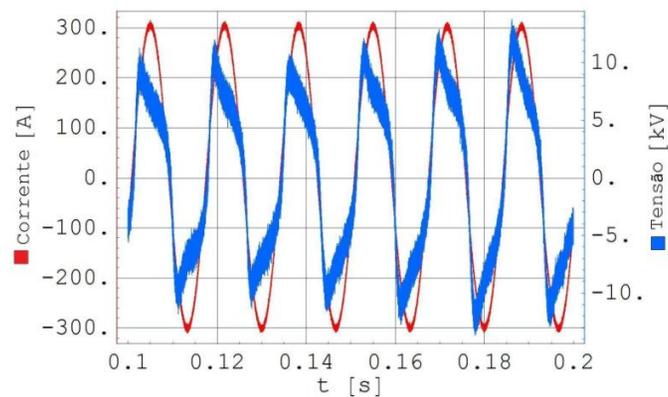


Figura 5.2: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A_{ef} entre 100 ms e 200 ms.

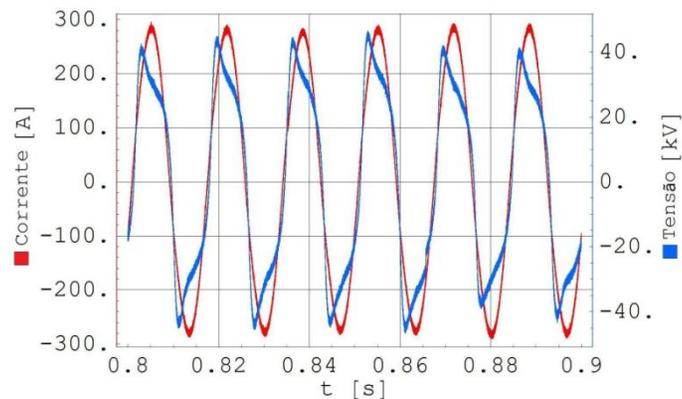


Figura 5.3: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada obtidas de um ensaio em campo de arco classe 200 A_{ef} e entre 800 ms e 900 ms.

Este tratamento inicial foi efetuado para todos os registros de ensaios recebidos. Ao final foram considerados válidos 647 ensaios, que formam a base de dados deste trabalho. Estes 647 ensaios validados estão divididos entre as classes de corrente sustentada aplicada conforme a tabela 5.1.

Tabela 5.1: Número de ensaios de arcos elétricos validados.

Classe de Corrente (A_{ef})	Número de Ensaios
15	47
20	20
30	47
50	21
60	108
100	71
150	51
200	85
300	52
500	49
1000	43
3000	29
5000	16
10.000	8

Todos os programas criados nesta fase do projeto bem como os demais que virão a ser citados foram elaborados utilizando-se do software Mathematica®, desenvolvido pela Wolfram Research, em suas versões 5.1 e 6.

5.2 ANÁLISE HARMÔNICA

Para a análise harmônica fez-se necessária uma severa sub-amostragem dos dados. Devido ao elevado número de cálculos computacionais envolvidos, uma amostragem grande tornaria o tempo de execução desta etapa impraticável. A taxa de amostragem utilizada para a obtenção do conteúdo harmônico foi de 50 kHz.

Uma primeira rotina computacional tratou de eliminar o conteúdo da pseudo-harmônica de ordem zero (nível DC). O termo pseudo-harmônica é utilizado pelo fato de a corrente e a tensão não serem funções perfeitamente periódicas no tempo, sendo assumida a hipótese de que no intervalo da análise de uma largura da janela utilizada o sinal pode ser tratado como periódico.

Uma segunda rotina teve como objetivo calcular, mediante aplicação da Transformada de Fourier Discreta em Tempo Reduzido, as pseudo-harmônicas de corrente e tensão até a 15ª ordem e gerar os gráficos correspondentes.

A Transformada de Fourier Discreta em Tempo Reduzido, também conhecida como Transformada de Fourier Discreta Janelada, é obtida dividindo-se o sinal em segmentos menores, através da multiplicação do sinal original por uma função janela. Para este fim, foi utilizada uma janela retangular, com largura correspondente ao período de 60 Hz e que se desloca em passos de 800 μ s. Então, o espectro de cada um dos segmentos é determinado pela Transformada de Fourier Discreta. A soma desses espectros mostra a evolução do conteúdo de frequência com o tempo, caracterizando uma distribuição tempo-frequência.

Usando os dados de ensaios da taxa de amostragem conhecida, em cada instante os coeficientes da Transformada de Fourier Discreta em Tempo Reduzido podem ser calculados por:

$$\hat{V}_h = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} V_m \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} hk\right) \quad (3)$$

Onde \hat{V}_h é a pseudo-harmônica complexa de tensão entre os terminais do arco de ordem h, k é o número sequencial ordinal da amostra, N é o número de amostras de uma largura da janela, V_m é a tensão entre os terminais do arco no instante $m = i - 0,5N + k$ (i é o instante no qual a pseudo-harmônica está sendo calculada, e corresponde ao centro da janela atual), j é a unidade imaginária. O mesmo é aplicado ao sinal de corrente.

A amplitude da h-ésima ordem da pseudo-harmônica V_h é obtida por:

$$V_h = |\hat{V}_h| = \sqrt{\text{Re}^2(\hat{V}_h) + \text{Im}^2(\hat{V}_h)} \quad (4)$$

Como exemplo das curvas obtidas nesta fase do trabalho, as fig. 5.4 a 5.8 representam os resultados do mesmo ensaio classe 200 A_{ef} para o qual foram mostradas as curvas de corrente e tensão. Os resultados referentes aos arcos das demais classes de corrente são

apresentadas no Apêndice B. A fig. 5.4 mostra as pseudo-harmônicas de primeira ordem da tensão entre terminais do arco (U_{h1}) e da corrente do arco (I_{h1}). Já a fig. 5.5 mostra as amplitudes das demais pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar calculadas para este ensaio. A fig. 5.6 mostra a relação existente entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e U_{h1} . Nota-se com a fig. 5.6 que as pseudo-harmônicas de ordem ímpar são bastante significativas e mantêm uma razão constante em relação à U_{h1} após um determinado período inicial. Sua influência, porém, decai conforme a ordem harmônica aumenta, com a amplitude da pseudo-harmônica de tensão de 15ª ordem já sendo desprezível.

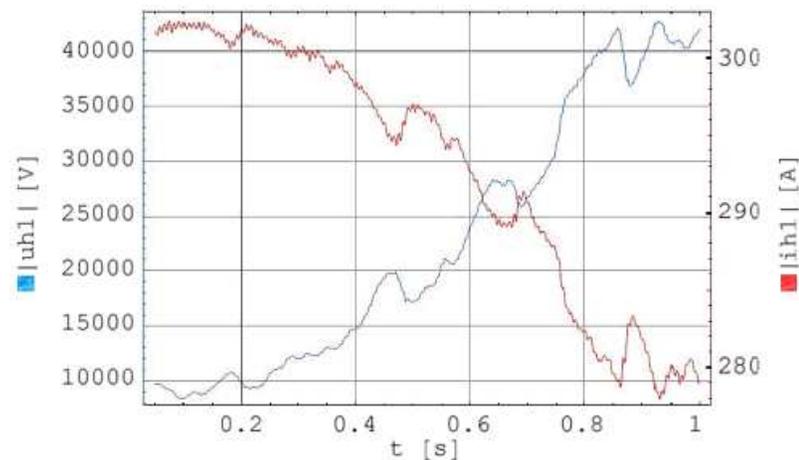


Figura 5.4: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 200 A_{ef} .

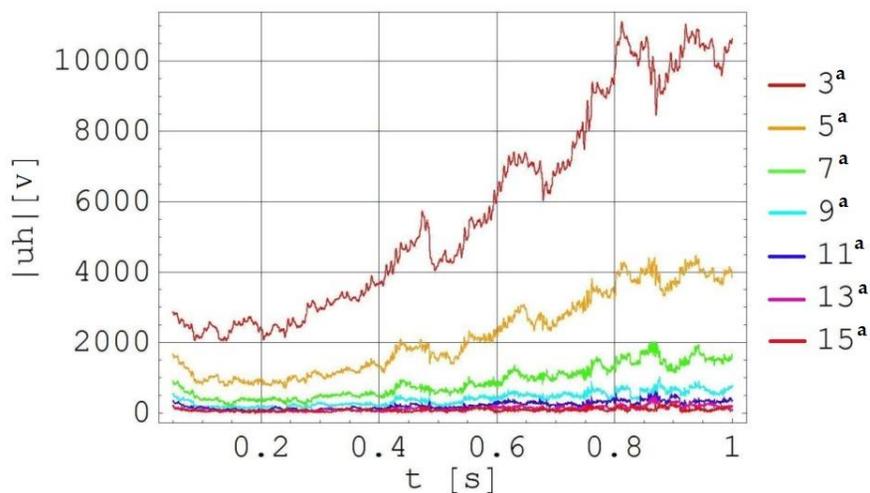


Figura 5.5: Amplitude das pseudo-harmônicas de ordem ímpar da tensão do arco classe 200 A_{ef} .

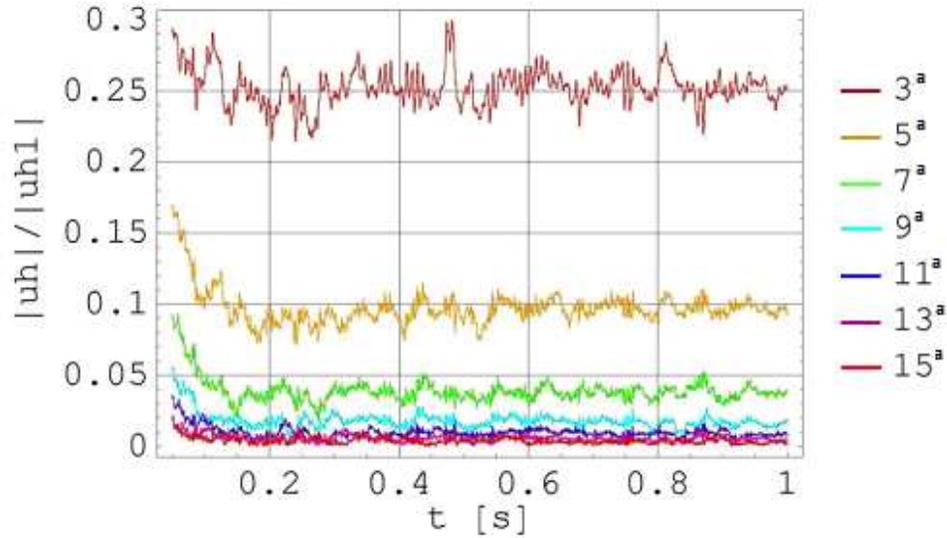


Figura 5.6: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e a de 1ª ordem de arco classe 200 A_{ef}.

Como a forma de onda da tensão (fig. 5.1) é aproximadamente simétrica em relação à abscissa, as frequências harmônicas presentes são primordialmente múltiplos inteiros ímpares da frequência fundamental, uma vez que as formas de onda simétricas a cada meio período não possuem harmônicas de ordem par. Assim, as pseudo-harmônicas de tensão de ordem par são de pequena relevância, como mostrado nas fig. 5.7.

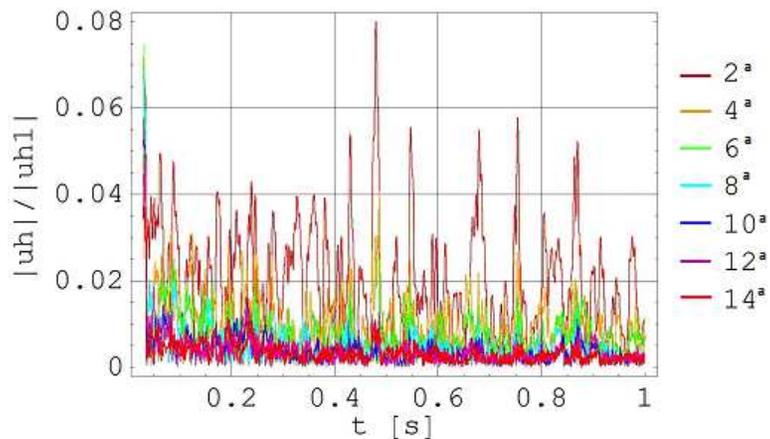


Figura 5.7: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem par e a de 1ª ordem de arco classe 200 A_{ef}.

A fig. 5.8 mostra o resultado das pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar em relação à I_{h1}. Como pode ser visto o conteúdo harmônico de corrente é bem menor que o

conteúdo harmônico de tensão, o que é válido também para as pseudo-harmônicas de corrente de ordem par, pelos motivos expostos anteriormente. Este baixo conteúdo harmônico de corrente é esperado devido à metodologia experimental utilizada de manter durante todo o ensaio o sinal de corrente imposto como um sinal sustentado aproximadamente “puro” de 60 Hz.

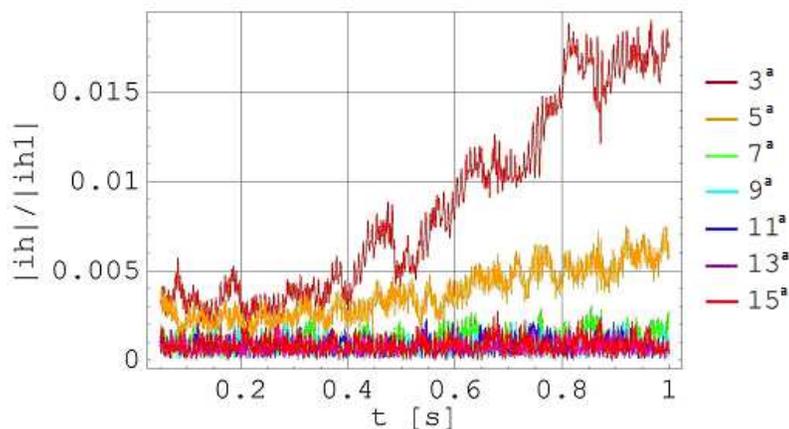


Figura 5.8: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e a de 1ª ordem de arco classe 200 A_{ef}.

Esta corrente sustentada aplicada nos ensaios não pode ser considerada ideal para representar a corrente que passa pelo arco secundário durante uma falta, uma vez que na realidade haverá um conteúdo harmônico presente também na corrente. Isto porque o conteúdo da tensão entre os terminais do arco irá gerar, por acoplamento, harmônicas de tensão de baixa amplitude nas fases sãs, que por sua vez também irão gerar por acoplamento pequenas correntes harmônicas no arco secundário.

Apesar disto é esperado que, assim como analisado nas fig. 5.4 a 5.8, o conteúdo harmônico de um arco secundário natural em um sistema de transmissão seja formado principalmente por harmônicas ímpares, que diminuem à medida que a ordem harmônica aumenta. É esperado também que existam tanto componentes harmônicas de corrente quanto de tensão entre os terminais do arco, entretanto o conteúdo harmônico de tensão deverá ser bem maior que o de corrente, pois a corrente de arco secundário é ocasionada pelo acoplamento entre fases e as tensões das fases sãs estão basicamente em 60 Hz. Esta característica harmônica bem definida do arco secundário, aqui denominada “assinatura harmônica”, pode ser utilizada para identificar sua existência [32].

Esta característica harmônica foi verificada nos ensaios analisados para todos os níveis de corrente sustentada, como será mostrado na seção a seguir.

5.3 CONTEÚDO HARMÔNICO

A análise harmônica descrita na seção anterior foi executada para um total de 647 arcos gerados nos ensaios de campo. A assinatura harmônica pode ser verificada após um tratamento estatístico dos conteúdos harmônicos obtidos.

Para assegurar que o resultado estatístico do conteúdo harmônico apresentado nesse trabalho seja relativo ao arco elétrico em condições estáveis, os primeiros 300 ms de cada ensaio foram desconsiderados no seu cálculo. Esse tempo inicial de descarte foi definido por análise de estabilidade do arco mediante uso do próprio conteúdo harmônico, em técnica proposta por este trabalho e que será melhor abordada adiante.

Para cada ensaio a relação entre as amplitudes das pseudo-harmônicas de tensão entre os terminais do arco, denominada simplificada por tensão do arco, e a da pseudo-harmônica de primeira ordem da tensão do arco foram medidas por:

$$\left[\frac{|h^{ésima}|}{|1^a|} \right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{V_{h_k}}{V_{l_k}} \quad 2 \leq h \leq 15 \quad (5)$$

onde h é a ordem da pseudo-harmônica, 1^a é a pseudo-harmônica de primeira ordem, N é o número total de amostras, V_h é a amplitude da tensão e k o número da amostra.

O valor médio de (5) foi calculado para os ensaios de cada classe de corrente:

$$\left[\frac{|h^{ésima}|}{|1^a|} \right]_{N_T} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \left[\frac{|h^{ésima}|}{|1^a|} \right]_i \quad 2 \leq h \leq 15 \quad (6)$$

onde N_T é o número de ensaios pertencentes a determinada classe de corrente.

O valor médio de tensão dos ensaios para cada classe de corrente foi calculado através de:

$$\overline{V_{ef}} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k^2} \quad (7)$$

A mesma formulação (5) até (7) é utilizada para os cálculos referentes à corrente.

Para a análise da dispersão estatística dos resultados foi utilizado o desvio padrão, calculado conforme apresentado em (8):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_T - 1} \sum_{i=1}^{N_T} \left(x_i - \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^{N_T} x_k \right)^2} \quad (8)$$

onde σ é o desvio padrão e x é a variável a ser analisada.

Os resultados estatísticos para o conteúdo harmônico (relação média das pseudo-harmônicas com a pseudo-harmônica de primeira ordem, e desvio padrão) de todos os testes analisados estão apresentados nas tabelas 5.2 a 5.4. Foi analisado um número suficiente de testes para permitir tal abordagem estatística, exceto para os arcos de classe de corrente 10.000 A_{ef}. A presença desta classe de corrente na tabela 5.4 é meramente informativa, e deve ser melhor estudada no futuro, quando mais ensaios forem disponibilizados. As ordens das pseudo-harmônicas omitidas nas tabelas 5.2 a 5.4 apresentaram médias inferiores a 1%.

Desconsiderando então os ensaios da classe de 10.000 A_{ef}, pelas tabelas 5.2 a 5.4 nota-se que a amplitude da pseudo-harmônica de tensão de 3ª ordem possui uma variação entre 19 % e 28 % em relação à amplitude da pseudo-harmônica de 1ª ordem (Uh1). A amplitude da pseudo-harmônica de tensão de 5ª ordem varia entre 6 % e 10 % em relação à Uh1 e a amplitude da pseudo-harmônica de tensão de 7ª ordem varia entre 1,7 % e 5 % em relação à Uh1. As demais pseudo-harmônicas possuem baixa amplitude e não são significativas para a assinatura harmônica. Ressalta-se que os desvios padrão das pseudo-harmônicas ímpares até a 11ª ordem das tensões são pequenos, indicando que os valores médios podem ser utilizados para caracterizar adequadamente estas pseudo-harmônicas.

Para se chegar a este resultado o procedimento foi similar ao empregado em [33] e também a mesma base de dados foi utilizada. Com relação ao procedimento, a diferença é o fato de que no presente trabalho os primeiros 300 ms de todos os testes foram descartados para obtenção das médias, visando obter um resultado relacionado apenas ao arco em condições estáveis, como já explicado anteriormente. Além disso a base de dados foi incrementada com 299 novos ensaios tratados, incluindo a análise de novas classes de corrente, aumentando-se a abrangência do estudo, em especial para os arcos de correntes mais elevadas.

As tabelas 5.2 a 5.4 mostram que mesmo com o descarte das medidas relativas aos primeiros 300 ms dos testes, os valores obtidos para a relação média entre as pseudo-

harmônicas e a pseudo-harmônica de primeira ordem foram bem próximos dos obtidos em [33] para os níveis de correntes correspondentes, com desvios padrões também pequenos.

Tabela 5.2: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte I

Classe de Corrente (A_{rms})			15	20	30	50	60					
Número de Ensaios			47	20	47	21	108					
I_{ef} (A_{ef})			15,52	22,47	35,09	53,48	63,72					
V_{ef} (kV_{ef})			21,60	20,13	19,35	16,77	16,71					
$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$ (%) e σ			$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ	$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ	$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ				
Tensão	Ordem Ímpar	3ª	26,530	1,273	22,531	0,629	22,471	0,849	22,928	0,854	25,033	1,079
		5ª	10,278	0,973	7,203	0,408	6,873	0,530	6,338	0,416	7,267	0,784
		7ª	4,665	0,527	2,817	0,228	2,590	0,285	2,259	0,182	1,769	0,366
		9ª	2,383	0,262	1,461	0,152	1,127	0,163	1,019	0,119	1,272	0,224
	Ordem Par	2ª	3,245	0,505	3,315	0,341	2,942	0,362	3,201	0,233	2,675	0,407
Corrente	O. Ímpar	4ª	1,847	0,353	1,592	0,218	1,386	0,164	1,622	0,132	1,337	0,215
	O. Par	3ª	1,523	0,271	1,158	0,286	1,248	0,493	1,055	0,261	1,336	0,381
		2ª	1,038	0,246	0,816	0,154	1,078	0,210	0,912	0,215	1,059	0,514

Tabela 5.3: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte II

Classe de Corrente (A_{rms})			100	150	200	300	500					
Número de Ensaios			71	51	85	52	49					
I_{ef} (A_{ef})			106,23	153,77	204,57	295,09	519,73					
V_{ef} (kV_{ef})			12,33	10,74	10,69	8,95	7,56					
$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$ (%) e σ			$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ	$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ	$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ				
Tensão	Ordem Ímpar	3ª	27,559	1,239	26,813	0,596	25,403	0,766	23,768	0,410	21,744	0,573
		5ª	9,443	0,807	10,260	0,525	9,876	0,669	9,159	0,387	7,832	0,371
		7ª	3,681	0,433	4,063	0,361	3,998	0,357	3,719	0,239	3,209	0,210
		9ª	1,713	0,224	1,938	0,174	1,843	0,209	1,672	0,129	1,473	0,113
	Ordem Par	2ª	2,784	0,587	2,479	0,404	2,640	0,445	2,533	0,257	2,789	0,510
Corrente	O. Ímpar	4ª	1,583	0,353	1,331	0,209	1,436	0,238	1,229	0,134	1,321	0,255
	O. Par	3ª	0,710	0,163	0,482	0,122	0,514	0,242	0,382	0,083	1,455	0,294
		2ª	1,004	0,222	1,108	0,173	1,119	0,479	1,420	0,105	1,157	0,112

Tabela 5.4: Assinatura Harmônica – Resultados Estatísticos - Parte III

Classe de Corrente (A_{rms})			1.000	3.000	5.000	10.000				
Número de Ensaios			43	29	16	8				
I_{ef} (A_{ef})			979,56	2.954,47	4.816,15	8.707,26				
V_{ef} (kV_{ef})			8,42	8,28	6,49	7,14				
$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$ (%) e σ			$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ	$\left(\frac{h^n}{1^a}\right)$	σ				
Tensão	Ordem Ímpar	3ª	21,175	0,740	20,892	0,937	19,345	0,813	19,616	0,931
		5ª	7,444	0,499	7,235	0,664	6,596	0,496	6,896	0,808
		7ª	3,178	0,278	3,168	0,385	3,108	0,380	3,398	0,629
		9ª	1,624	0,170	1,704	0,264	1,820	0,296	1,980	0,427
	Ordem Par	2ª	3,401	0,520	3,821	0,494	3,879	0,500	4,880	0,617
Corrente	O. Ímpar	4ª	1,678	0,296	1,801	0,263	1,927	0,305	2,386	0,392
	O. Par	3ª	1,817	0,653	1,284	0,262	1,151	0,269	1,126	0,392
		2ª	1,296	0,398	1,461	0,394	0,888	0,108	1,086	0,122

Os valores obtidos para as novas classes de correntes analisadas (15 A_{ef} , 20 A_{ef} , 30 A_{ef} , 50 A_{ef} , 1000 A_{ef} , 5000 A_{ef} e 10.000 A_{ef}) estão de acordo com a assinatura harmônica esperada, com a relação média entre a 3ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão na faixa de

19 % a 27 %, a relação média entre a 5ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão entre 6 % e 10 % e a relação média entre a 7ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão entre 2 % e 5 %.

Os gráficos das fig. 5.9 e 5.10 destacam os valores médios das duas pseudo-harmônicas de tensão mais relevantes em relação à de primeira ordem. Nota-se uma tendência de declínio destas harmônicas a partir dos ensaios de 150 A_{ef}, entretanto, para os ensaios de corrente menores que esta classe essa tendência não é verificada.

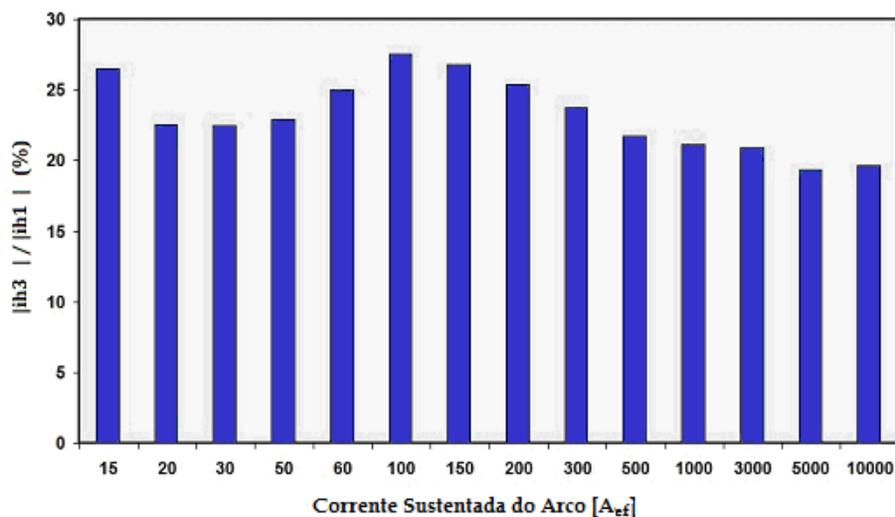


Figura 5.9: Relação média entre a pseudo-harmônica de 3ª ordem e a de 1ª ordem de tensão.

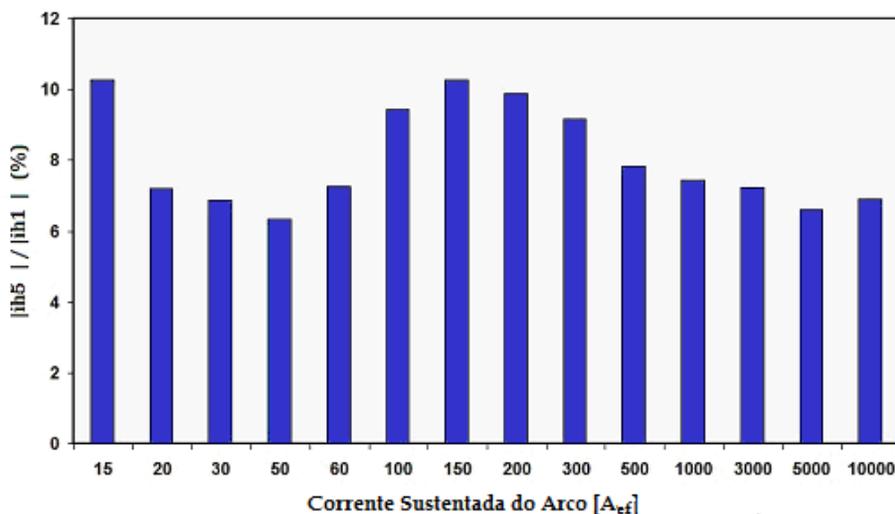


Figura 5.10: Relação média entre a pseudo-harmônica de 5ª ordem e a de 1ª ordem de tensão.

6 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DO ARCO ELÉTRICO

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Considerando as propriedades elétricas do arco em condições estáveis algumas equações relacionando a tensão do arco ao seu comprimento foram conseguidas empiricamente por outros autores. Devido às características de ensaio dos arcos longos analisados neste trabalho - com níveis de corrente de ensaio de baixos a altos valores, mas com pequena variação dessa corrente durante um mesmo ensaio - a equação a ser utilizada neste trabalho para a estimativa de variação de comprimento do arco elétrico será igual à utilizada por Warrington [23]:

$$U_a = \frac{k}{I^\alpha} L \quad (9)$$

onde U_a é a tensão entre os terminais do arco, L o comprimento do arco, I o valor da corrente eficaz fluindo através do arco, k e α são parâmetros estimados empiricamente.

Os valores de k e α a serem utilizados neste trabalho não corresponderão aos originalmente apresentados por Warrington, uma vez que os mesmos têm sido contestados em trabalhos mais recentes [31]. Portanto, para que a estimativa de comprimento pudesse ser feita para qualquer instante de um ensaio, os valores destes parâmetros precisaram ser definidos.

Adotou-se nesta etapa a metodologia de fixar um valor de $\alpha = 0,25$, com k sendo obtido para cada ensaio. Além disso, ao invés de se utilizar em (9) os valores eficazes de tensão entre os terminais do arco e de corrente do arco foram utilizados os valores das pseudo-harmônicas de primeira ordem de tensão e de corrente.

Desta forma, para se avaliar a relação do comprimento do arco com sua primeira pseudo-harmônica de tensão para cada ensaio, ou seja, para se determinar o parâmetro k , o comprimento do arco em um instante determinado precisa ser conhecido. A obtenção desse comprimento aproximado dos arcos foi feita por inspeção visual dos vídeos (decompostos

em quadros) que registraram os ensaios. Depois de selecionado o quadro da filmagem que serviria como referência, este era impresso e utilizado para estimar o comprimento do arco no instante ao qual o quadro representava. A cadeia de isoladores de 4,05 m foi usada como escala para esta medição.

Ressalta-se que um erro não desprezível deve ser considerado nesta medida, visto que o comprimento é obtido a partir da imagem plana de uma das câmeras. Para minimizar este erro, apenas ensaios nos quais os arcos se alongaram predominantemente no plano captado por uma das câmeras foram considerados. Além disso, ensaios que apresentaram grande luminosidade e não possibilitaram um registro preciso do contorno do arco também foram descartados. Estas imposições acarretaram no aproveitamento de apenas 97 dos 647 ensaios disponíveis para esta etapa de estimativa do comprimento do arco elétrico.

Outra restrição aplicada para se obter resultados mais confiáveis é que esta inspeção visual deveria ser feita o mais próximo possível do instante de ignição do arco, pois quanto mais o arco se alonga, mais ele se desdobra tridimensionalmente, tornando menos precisa a análise visual plana disponível. Porém esta medida não pode ser feita imediatamente após a ignição do arco. Isto porque o arco precisa estar estável para que (9) seja válida e durante um intervalo de tempo após sua formação no ensaio, o arco ainda não possui suas características elétricas estabilizadas. Este fato se deve principalmente a uma ou mais das seguintes razões:

- influência de vapores metálicos resultantes do fio fusível usado para a ignição do arco;
- contato direto do arco elétrico com a cadeia de isoladores, causando transferência de calor;
- tempo insuficiente para a estabilização do plasma.

Assim, para que a estimativa de comprimento do arco elétrico possa ser realizada com maior precisão, o parâmetro k deve ser obtido o mais próximo possível da ignição do arco elétrico mas somente após a estabilização deste no ar. Ou seja, a escolha do quadro do vídeo no qual será mensurado o comprimento do arco deve obedecer a estas restrições. É portanto de fundamental importância que o instante a partir do qual o arco possa ser considerado estabilizado possa ser definido. A técnica desenvolvida para este fim será apresentado na próxima seção.

Ressalta-se aqui que outras técnicas vêm sendo desenvolvidas visando uma estimativa de comprimento de arcos elétricos no ar mais precisa. Uma alternativa estudada é a adoção de técnicas de computação gráfica que permitem avaliar de forma tridimensional o desenvolvimento do arco elétrico durante o ensaio, possibilitando que o comprimento seja estimado a qualquer momento [34]. Tal técnica entretanto exige que as câmeras sejam arranjadas em pontos específicos durante o ensaio, o que impossibilita seu uso no tratamento dos ensaios já realizados até o momento.

6.2 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO ARCO A PARTIR DO CONTEÚDO HARMÔNICO

Como descrito na seção anterior, a relação do comprimento do arco com sua primeira pseudo-harmônica de tensão só pode ser obtida após o arco estar estabilizado no ar. Por acreditar que o contato com a cadeia de isoladores seria a razão desta instabilidade inicial do arco, a visualização do arco sem esse contato foi em um primeiro momento o critério usado para a escolha do quadro a partir do qual o comprimento do arco seria determinado visualmente.

A fig. 6.1 mostra a sequência de quadros extraída do início do vídeo de um dos ensaios selecionados para este trabalho. A partir do critério adotado, da visualização do arco sem contato com a cadeia de isoladores, o quadro inferior à direita foi o escolhido para a medição visual do arco. Nesse exemplo as câmeras registram o ensaio a uma taxa de 30 quadros/s.

Relacionando o comprimento do arco obtido mediante a inspeção visual com o valor da sua pseudo-harmônica de tensão no mesmo instante (que será denominado daqui por diante como instante inicial t_0), a partir de (9) o parâmetro k pode ser obtido e o comprimento do arco estimado para todo o restante do ensaio. Este procedimento foi adotado para todos os 76 ensaios selecionados à época.

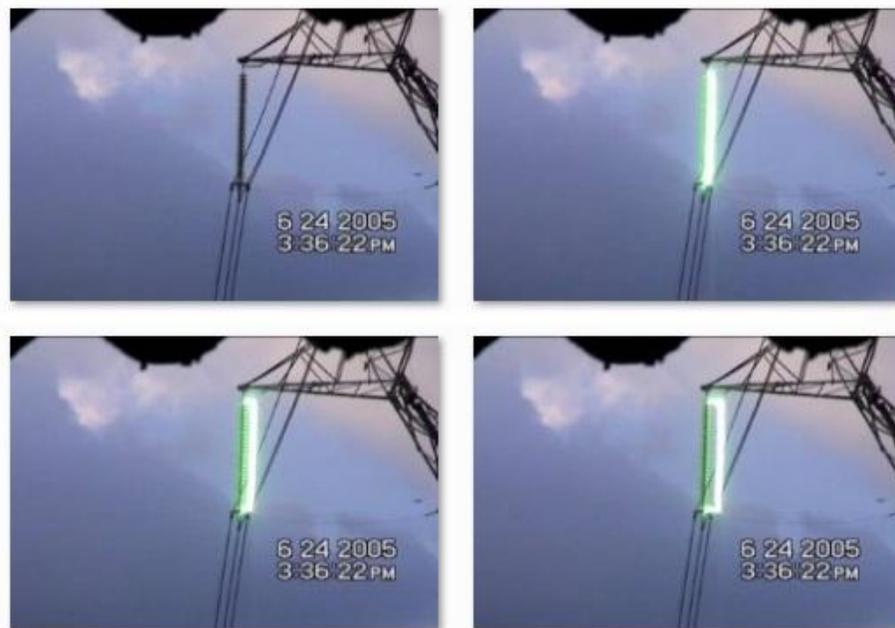


Figura 6.1: Instantes iniciais de um ensaio classe 60 A_{cf}.

Os resultados obtidos com esta metodologia inicial entretanto não foram consistentes. Verificou-se para uma quantidade considerável de ensaios que a esperada relação entre a primeira pseudo-harmônica de tensão do arco e o seu comprimento não ocorreu. Isso pode ser facilmente identificado em alguns ensaios onde o aumento relativo da primeira pseudo-harmônica de tensão notadamente não foi correspondido pelo alongamento do arco. A fig. 6.2 exemplifica tal inconsistência: os quadros correspondem a dois instantes do ensaio em que o valor da pseudo-harmônica de primeira ordem da tensão no segundo instante é praticamente o dobro do valor que possuía no primeiro instante (indicadas na curva). Nota-se visualmente que o alongamento do arco não corresponde a tal aumento.

A inconsistência encontrada para alguns ensaios pela metodologia citada sugere que esses arcos ainda não estavam estabilizados em t_0 , quando a relação entre o comprimento do arco e sua pseudo-harmônica de tensão foi aferida. Como consequência estes ensaios apresentavam um alongamento do arco muito alto.

Iniciou-se então a busca por um novo critério que determinasse quando o arco estaria efetivamente estabilizado no ar. Comparando-se os ensaios que haviam tido resultados consistentes com os que não haviam segundo a metodologia anterior, notou-se que aqueles com resultados satisfatórios tiveram sua relação comprimento-tensão estabelecida em um

instante no qual o seu conteúdo harmônico já apresentava um perfil considerado estável, enquanto os que apresentaram inconsistência tiveram sua relação comprimento-tensão estabelecida quando o conteúdo harmônico ainda não havia se estabilizado. As fig. 6.3 e 6.4 mostram o conteúdo harmônico de um ensaio com resultado coerente e outro inconsistente, respectivamente, com o instante em que a relação comprimento-tensão foi estabelecida.

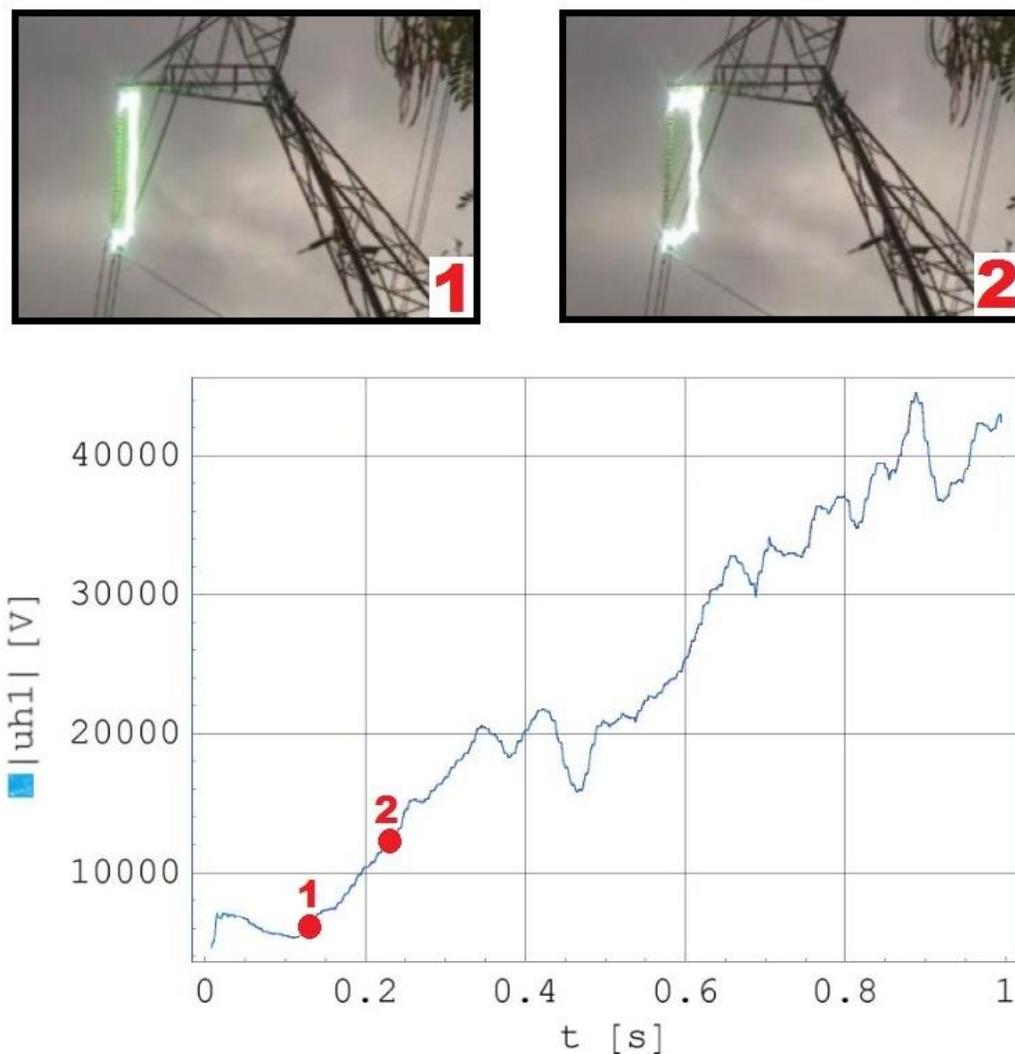


Figura 6.2: Comparação entre o alongamento do arco e a primeira pseudo-harmônica de tensão.

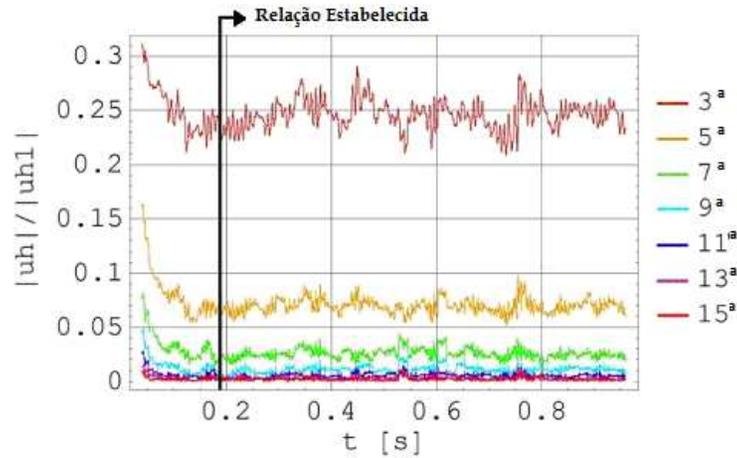


Figura 6.3: Momento em que foi estabelecida a relação comprimento-tensão para ensaio com resultado coerente.

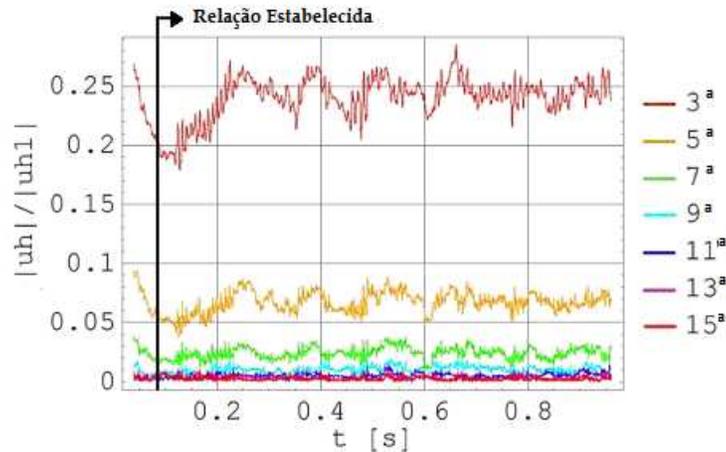


Figura 6.4: Momento em que foi estabelecida a relação comprimento-tensão para ensaio com resultado inconsistente.

A partir desta constatação surgiu a hipótese de que a estabilização do conteúdo harmônico poderia ser utilizada como ferramenta para estimar a partir de que instante o arco estaria com suas características elétricas também estabilizadas.

O instante a partir do qual o arco se encontra estável para todos os ensaios foi então obtido pela hipótese citada. A grande maioria dos ensaios teve este instante determinado entre 200 ms e 300 ms. A fig. 6.5 mostra como o instante de estabilidade foi estimado para 4 ensaios de níveis de corrente distintos. Nota-se que o conteúdo harmônico dos ensaios apresenta distinta variação em um momento inicial mas que tende a se estabilizar, sendo este momento de estabilização o indicativo de que o arco também se estabilizou.

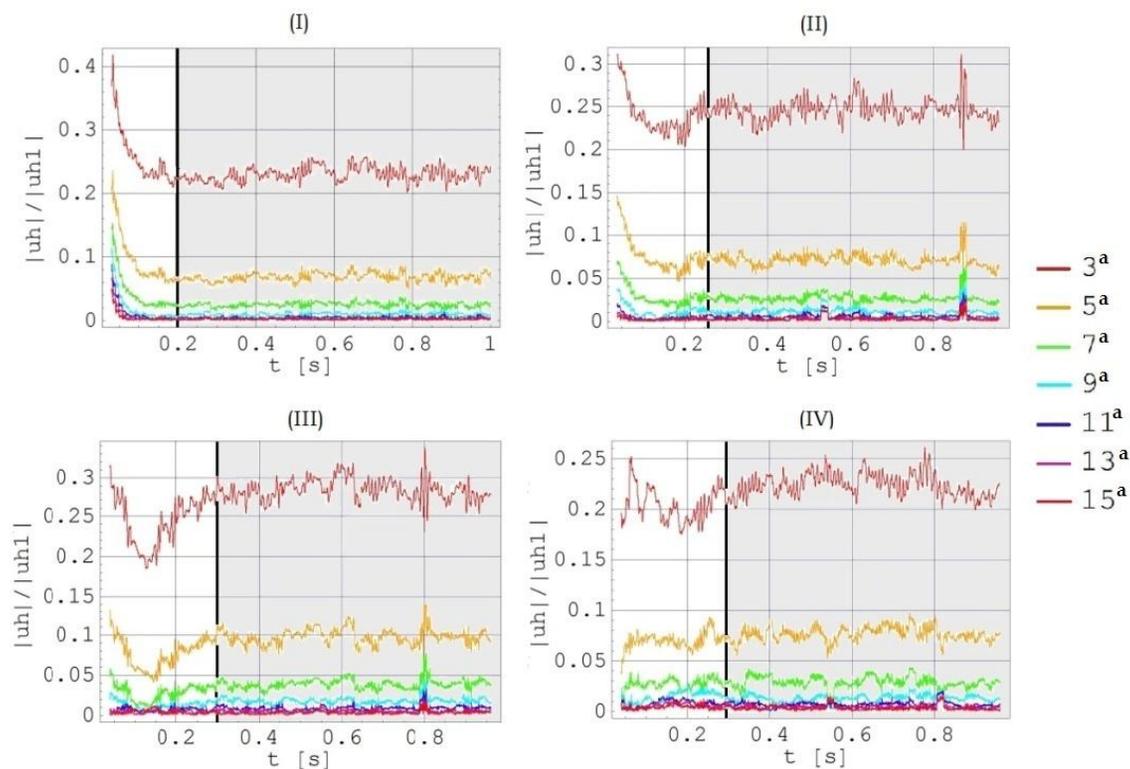


Figura 6.5: Instante em que o arco se estabiliza para quatro diferentes testes: (I) arco classe 30 A_{ef} , (II) arco classe 60 A_{ef} , (III) arco classe 100 A_{ef} e (IV) arco classe 500 A_{ef} .

Com o instante t_0 sendo então obtido a partir da determinação da estabilidade do arco através da análise do conteúdo harmônico, os quadros correspondentes foram utilizados para uma nova estimativa visual do comprimento do arco. Os valores de k e a variação de comprimento estimada para todos os ensaios foram novamente obtidos. Os resultados alcançados com esta metodologia, apresentados na seção seguinte, se mostraram mais consistentes com os registros visuais do que a anterior, validando esta técnica de identificação do instante de estabilização do arco.

6.3 ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO

O total de casos de tratados foi restringido a 97, conforme descrito na seção 6.1, com níveis de corrente variando de 15 A_{ef} a 5000 A_{ef} . Na tabela 6.1 são apresentados o número de testes analisados, a velocidade média de alongamento e o comprimento máximo

alcançado pelo arco para cada classe de corrente, utilizando-se a metodologia descrita na seção 6.2. A velocidade média foi obtida no período entre o instante da medida visual do arco elétrico (t_0) e o instante em que o arco alcançou seu comprimento máximo durante o ensaio. A taxa de variação do comprimento do arco varia muito ao longo do ensaio, tendo sido considerado que a velocidade média representa mais adequadamente o alongamento do arco para cada classe de corrente. Nota-se uma grande variação nos resultados mesmo entre os ensaios de igual nível de corrente, porém na média há uma tendência de maior velocidade e alongamento para arcos de níveis de correntes menores. Os arcos de 15 A_{ef} , por exemplo, na média alongaram-se 30% mais do que os arcos de 300 A_{ef} .

Tabela 6.1: Estimativa da Variação de Comprimento do Arco.

Classe de Arco (A_{ef})	Número de Ensaios	Velocidade Média de Alongamento [m/s]				Comprimento Máximo [m]			
		Média	σ	Mínima	Máxima	Média	σ	Mínimo	Máximo
15	10	36,32	12,24	17,45	50,87	33,69	9,76	18,38	45,71
20	3	33,23	18,72	14,40	51,83	35,63	12,83	22,75	48,41
30	13	28,29	8,40	14,69	40,26	28,20	6,66	18,31	39,08
60	35	27,65	7,27	16,14	44,46	27,84	5,82	18,30	42,88
100	7	26,97	7,95	18,20	38,00	25,30	7,13	19,40	38,60
150	2	27,00	14,09	17,03	36,97	26,58	9,99	19,52	33,64
200	7	28,88	6,39	21,52	40,79	29,72	4,86	24,08	37,28
300	14	25,65	4,95	17,12	35,47	25,77	3,12	20,91	33,13
500	1	21,11	*	*	*	21,91	*	*	*
1.000	3	23,71	9,66	17,18	34,81	26,85	7,81	22,12	35,86
5.000	2	17,31	8,45	11,34	23,29	19,12	2,81	17,14	21,11

Destaca-se aqui a dificuldade de se obter a variação de comprimento para os arcos de altos níveis de corrente pelo método visual proposto, pois estes geram uma luminosidade intensa, que acaba saturando as imagens capturadas pelas câmeras. Apenas os experimentos mais recentes, registrados com câmeras mais avançadas, permitiram a análise destes arcos, justificando a pequena quantidade analisada até o momento.

As fig. 6.6 e 6.7 mostram a variação de comprimento de todos os arcos analisados das classes de corrente 60 A_{ef} e 300 A_{ef} , respectivamente. Nas fig. 6.8 e 6.9, apenas três casos de cada uma dessas classes de corrente são apresentados: os que tiveram maior e menor variação de comprimento, e um experimento que apresentou uma variação de comprimento próximo à média. Para a escolha dos arcos com maior e menor variação de comprimento foi considerado o tamanho máximo que o arco elétrico atingiu durante o ensaio, o que não necessariamente ocorre ao final do ensaio. Observando estas figuras fica claro que o complexo comportamento do arco elétrico é evidente também em sua variação de com-

primento, com o arco aumentando e diminuindo durante o ensaio. A diminuição do comprimento ocorre principalmente quando o arco se enrola em torno de si formando um novelo, o que acarreta em uma separação abrupta deste trecho em relação ao restante do arco. As curvas referentes aos demais ensaios analisados são mostradas no Apêndice C.

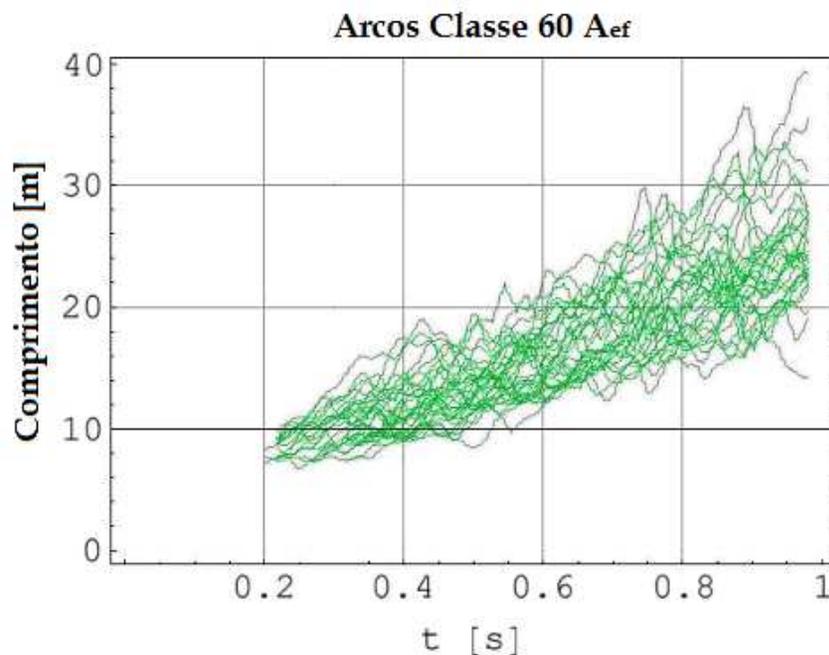


Figura 6.6: Estimativa de comprimento para arcos classe 60 A_{ef}.

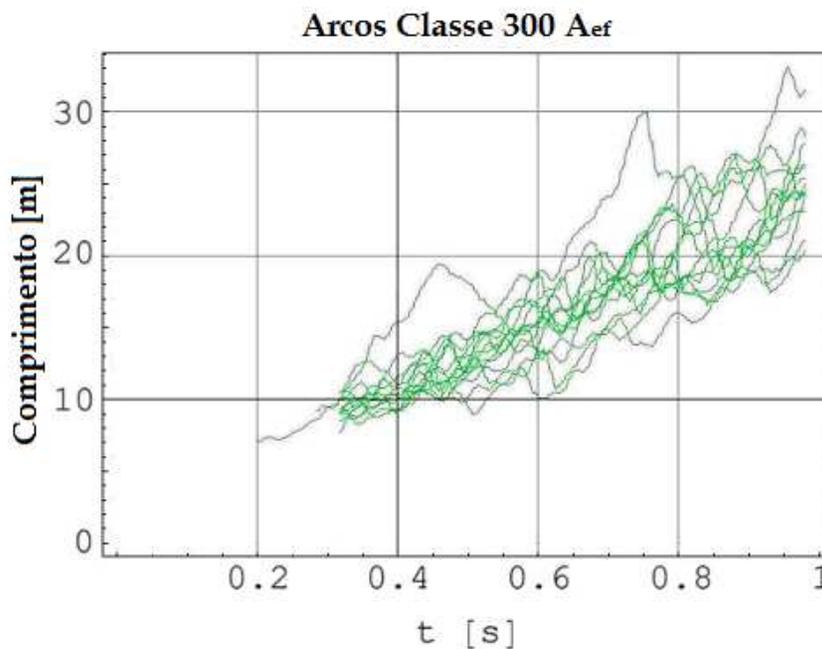


Figura 6.7: Estimativa de comprimento para arcos classe 300 A_{ef}.

Uma importante influência para o alongamento do arco é o comportamento do vento durante o ensaio. Como já citado na seção 5.1, até o momento tal correlação não foi estudada, pois na maioria dos ensaios tratados as medições de vento foram amostradas em uma frequência muito baixa, incompatíveis com a rápida variação de comprimento averiguada. Apenas os ensaios mais recentes possuem um registro do vento a uma taxa suficiente a permitir uma análise precisa.

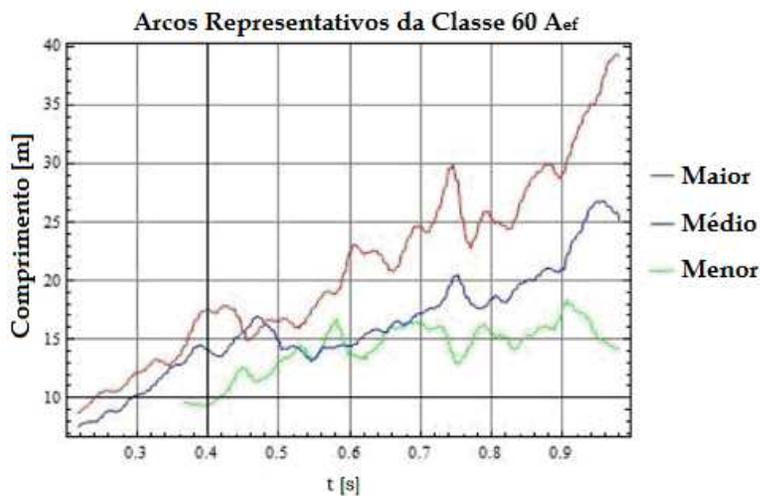


Figura 6.8: Estimativa de comprimento para três arcos representativos da classe 60 A_{ef} .

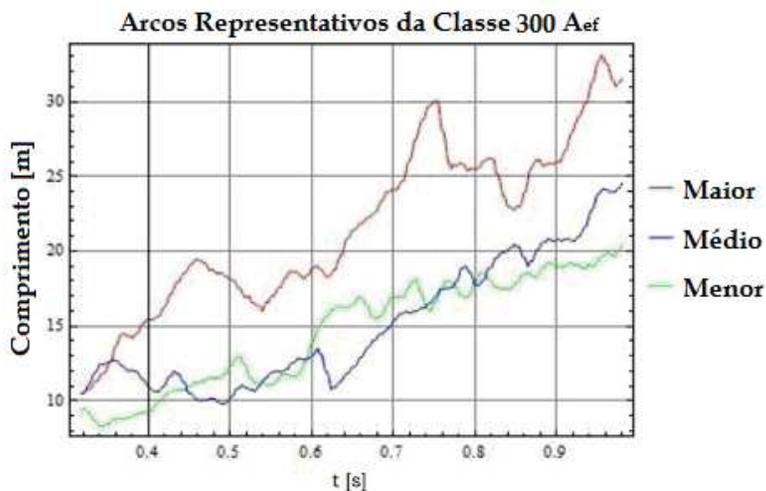


Figura 6.9: Estimativa de comprimento para três arcos representativos da classe 300 A_{ef} .

6.4 GRADIENTE DE TENSÃO DO ARCO ELÉTRICO

Como mencionado anteriormente, nas condições nas quais os ensaios foram realizados, os arcos elétricos demoram entre 150 ms e 300 ms para adquirirem estabilidade. Somente a partir deste período inicial é que características como o gradiente de tensão (E_a) de fato apresentarão valores consistentes ao nível de corrente do arco analisado. Como o arco se alonga consideravelmente nesse período de instabilidade, faz-se necessário uma estimativa de seu comprimento para a obtenção desse gradiente. Considerá-lo igual ao tamanho da distância entre os eletrodos (neste caso a distância da cadeia de isoladores), prática comum em alguns trabalhos disponíveis na literatura, representa um grande erro. A fig. 6.10 exemplifica a situação mostrando um arco de 15 A_{ef} após 300 ms da ignição do fio fusível. Foi estimado um comprimento de 10,1 m para este arco neste instante, portanto 2,5 vezes maior que o comprimento da cadeia de isoladores (4,05m).

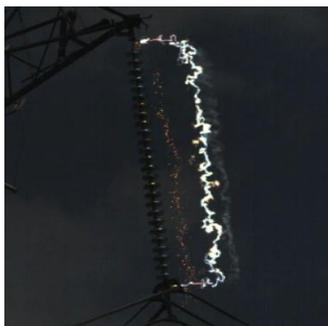


Figura 6.10: Arco classe 15 A_{ef} após 300 ms de sua ignição.

Respeitando o período de estabilização, a partir do comprimento do arco elétrico visualmente medido pode-se obter E_a de:

$$U = E_a L \quad (10)$$

Onde U é a tensão do instante correspondente ao pico de corrente mais próximo de t_0 , E_a é o gradiente de tensão e L o comprimento do arco.

A adoção da tensão no instante correspondente ao pico de corrente mais próximo de t_0 foi feita para possibilitar a comparação dos resultados obtidos com os trabalhos disponíveis na literatura estudados.

A tabela 6.2 mostra os valores médios do gradiente de tensão (E_a) calculado para os arcos descritos na tabela 6.1.

Tabela 6.2: Gradiente de tensão dos arcos elétricos.

Classe de Arco [A_{ef}]	15	20	30	60	100	150	200	300	500	1.000	5.000
E_a [kV/m]	1,56	1,99	1,68	1,26	1,09	0,94	0,93	0,76	0,92	0,75	0,65

Nota-se pela tabela 6.2 a relação inversa de E_a com o nível de corrente do arco. Esses valores obtidos divergem dos da literatura averiguada até o momento. Destaca-se que valores dispersos de E_a foram obtidos para arcos de mesma classe de corrente. Na fig. 6.11 são plotados os valores de E_a de todos ensaios até a classe de corrente 300 A_{ef} e traçada uma linha de tendência para essa faixa de correntes. A corrente considerada é a de pico mais próxima de t_0 . Os ensaios das classes de 500 a 5.000 A_{ef} foram omitidos, pois constituem um número de amostra insuficiente para representar tamanha faixa de corrente. Além disso, nesse estudo ainda não foi considerada a influência do "jato de arco", que é crescente com o nível de corrente. O "jato de arco" é uma região próxima aos eletrodos (em torno de 0,5 m em altas correntes) na qual o arco elétrico apresenta características distintas do restante da coluna, dentre elas um maior E_a [29].

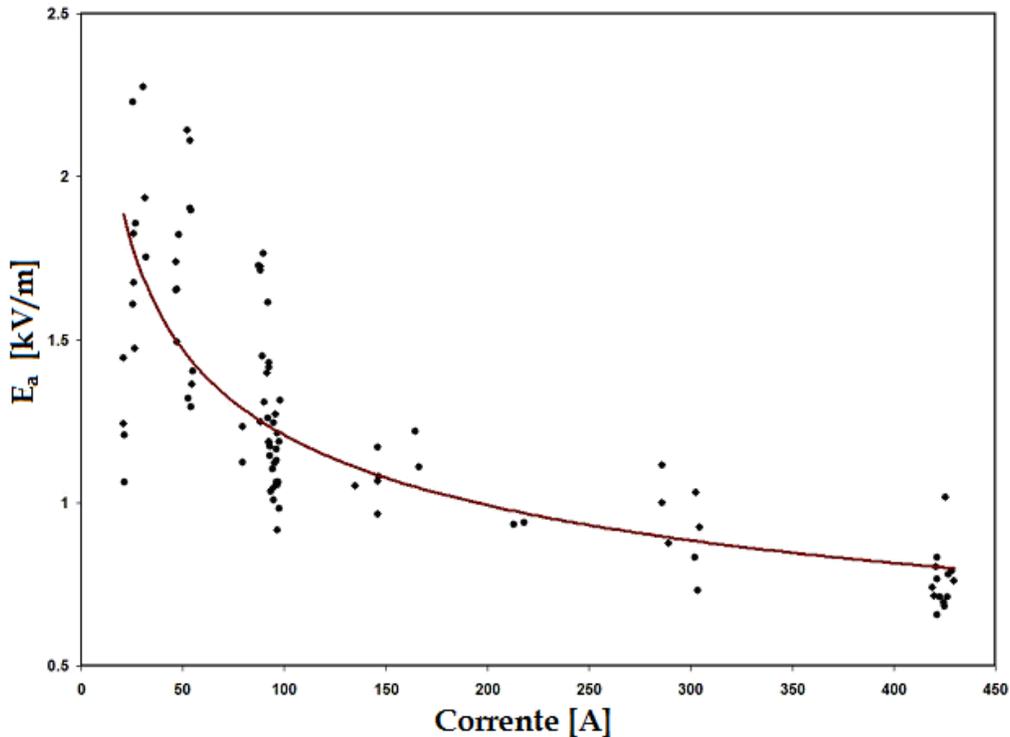


Figura 6.11: Gradiente de tensão dos arcos elétricos.

A linha de tendência na fig. 6.11 foi obtida de forma direta com ferramenta disponível no software Microsoft Excel a partir da plotagem dos pontos, e apresenta os seguintes parâmetros:

$$E_a = \frac{4,446}{I^{0,2831}} \text{ kV/m} \quad (11)$$

As constantes presentes em (11) equivalem aos parâmetros k e α de (9). Desta forma, a obtenção de uma curva precisa para os resultados de E_a dos arcos elétricos, resultaria também nos valores dos parâmetros k e α que melhor representem o comportamento do arco elétrico na faixa de corrente analisada.

Caso haja no futuro a obtenção de mais resultados de E_a dos arcos elétricos de diferentes classes de corrente, em especial os de correntes superiores a 100 A, será possível alcançar uma maior precisão dos parâmetros de (11), com estes podendo ser adquiridos por faixas. Desta forma, parâmetros k e α poderiam ser definidos distintamente para arcos com correntes de pico de até 100 A, outros para arcos entre 100 A e 500 A e por fim para arcos acima de 500 A, por exemplo.

Os resultados E_a obtidos neste trabalho diferem de resultados encontrados na literatura. A fig. 6.12 compara a curva obtida neste trabalho, com as curvas encontradas em cinco referências [23, 24, 29, 35, 36]. As equações para E_a de cada autor está em destaque na parte superior da figura. Nota-se que os resultados aqui obtidos se assemelham apenas aos de Maikapar [35], sendo bem distintos dos demais.

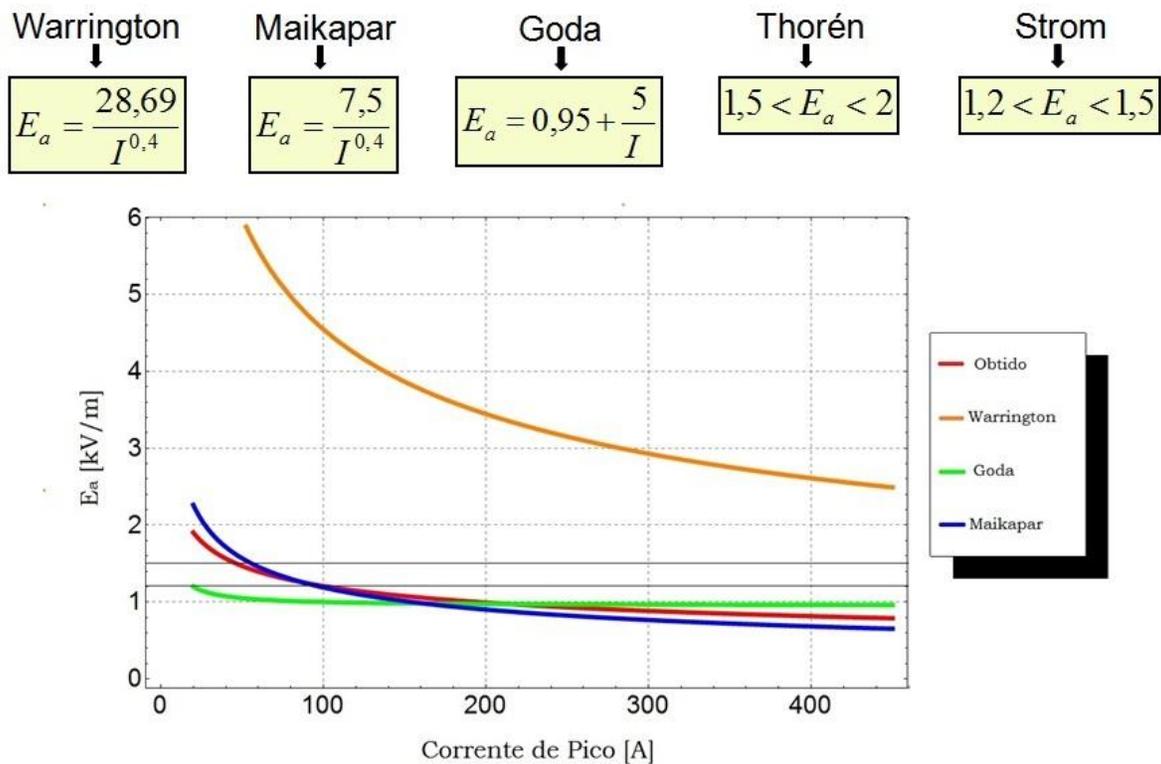


Figura 6.12: Comparativo dos resultados de E_a obtidos com valores encontrados na literatura.

7 CONCLUSÃO

Considerando a metodologia de execução dos ensaios de campos de impor uma corrente sustentada de 60 Hz no arco com pequeno nível de harmônicas, foi possível consolidar uma assinatura harmônica do arco elétrico ao analisar as pseudo-harmônicas de tensão entre os terminais de arcos com níveis de corrente sustentada variando de 15 A_{ef} a 5.000 A_{ef} .

Devido a esta assinatura o conteúdo harmônico do arco pode ser utilizado para se identificar o instante a partir do qual o arco pode ser considerado estável no ar. Este instante é determinado identificando-se quando as relações entre as pseudo-harmônicas de ordem ímpar e a pseudo-harmônica de primeira ordem de tensão do arco se tornam aproximadamente constantes, o que ocorre para os arcos experimentais tratados majoritariamente entre 150 ms e 300 ms.

Resultados estatísticos para o conteúdo harmônico considerando apenas o período no qual o arco está estabilizado foram apresentados. Os resultados foram similares aos obtidos em um trabalho anterior no qual a estabilidade do arco não foi considerada e estão de acordo com a assinatura harmônica esperada, com a relação média entre a 3ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão na faixa de 19% a 27%, a relação média entre a 5ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão entre 6% e 10% e a relação média entre a 7ª e a 1ª pseudo-harmônica de tensão entre 2% e 5%.

Devido ao grande número de ensaios analisados (647) e aos diversos níveis de correntes analisados, é esperado que esta assinatura harmônica seja válida para arcos secundários de qualquer amplitude de corrente.

Foi obtida também a variação de comprimento de 97 arcos elétricos abrangendo diversos níveis de correntes. Os resultados demonstraram grande variação no alongamento dos arcos elétrico, mesmo entre os de igual nível de corrente, porém na média há uma tendência de maior velocidade e alongamento para arcos de níveis de correntes menores. Os arcos de 15 A_{ef} , por exemplo, na média alongaram-se 30% mais do que os arcos de 300 A_{ef} . A velocidade média de alongamento do arco varia de 36 m/s para a classe de corrente de 15 A_{ef} a 25 m/s para a classe de corrente de 300 A_{ef} .

Com a estimativa de comprimento do arco é possível calcular com maior precisão o gradiente de tensão dos arcos elétricos longos, como os estudados nesse trabalho. Resultados preliminares têm indicado um valor de gradiente de tensão consideravelmente diferente do que os analisados na literatura até o momento, os quais são normalmente obtidos negligenciando-se a questão da estabilização do arco e/ou seu alongamento. Utilizando-se todos os valores de gradiente de tensão calculados foi possível estimar uma curva do valor de gradiente em função da corrente de pico do arco elétrico. Esta curva poderia ter seus parâmetros melhores definidos, ou até mesmo ser dividida por faixas de correntes, caso houvesse um número maior de gradientes de tensão de ensaios com correntes de pico acima de 100 A calculado.

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Procurar avaliar a influência das variáveis climáticas presentes, e registradas, durante os ensaios no que tange ao conteúdo harmônico e ao alongamento do arco elétrico. Em especial procurar quantificar a influência do vento, da qual se espera que haja uma importante correlação com o alongamento do arco;
- Que a estimativa da variação de comprimento dos arcos elétricos analisados neste trabalho seja feita utilizando-se de metodologia diferente da aqui adotada, permitindo uma comparação dos resultados. Uma possibilidade seria a adoção de técnicas de análise via computação gráfica, como, por exemplo, a apresentada em [34];
- Obter o gradiente de tensão de um maior número de arcos elétricos, e de distintas classes de corrente, de tal sorte a possibilitar uma curva mais robusta que represente o gradiente de tensão em função da corrente do arco elétrico, ou ainda que ela possa ser fracionada de modo a representar uma faixa específica de corrente;
- Por fim, que os resultados apresentados referentes ao conteúdo harmônico e à variação de comprimento dos arcos elétricos, sejam incorporados em um novo modelo de arco elétrico longo no ar.

REFERÊNCIAS

1. W.H. Van Zee, "500 kV System relaying-design and operating experience", CIGRE - Conseil International des Grands Réseaux Électriques, n. 34-07, Paris, 1978.
2. S. O. Frontin, "Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão", Brasília: Goya, 2010.
3. Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Plano de Ampliação e Reforços 2012-2014 - Sumário Executivo", em: http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx, acesso em 07 de maio de 2012.
4. Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Sistema de operação horizonte 2012", em: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx, acesso em 07 de maio de 2012.
5. E.W. Kimbark, "Selective-Pole Switching of Long Double-Circuit EHV Line", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 95, pp. 219-230, Jan.1976.
6. A.J. Gonzales, "Effects of single and three pole switching and high speed reclosing on turbine generator shafts and blades", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, No.11, pp. 3218-3228, Nov.1984.
7. E.W. Kimbark, "Charts of three quantities associated with single-pole switching", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 94, pp. 388-395, 1975.
8. A.S. Câmara, "Modelagem de arco elétrico no ar. Aplicações em sistemas de potência", tese de doutorado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2010.
9. J. Haubrich, "Single pole reclosing on long EHV transmission lines", CIGRE, Rep. 31-09, 1974.
10. D.E. Perry, "Investigation and evaluation of single phase switching on EHV networks in the United States", CIGRE, Rep. 39-08, 1984.
11. H.N. Schnerer, "Single phase switching tests on 765 kV and 750 kV transmission lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 6, pp. 1536-1548, 1985.
12. IEEE Power System Relaying Committee Working Group, "Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines - IEEE Committee Report", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 182-192, Jan.1992.

13. M. E. Zevallos A., "Análise de sensibilidade da corrente de arco secundário para diferentes linhas de transmissão", dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas-SP, 2007.
14. R.M. Hasibar, "The Application of High-Speed Grounding Switches For Single-Pole Reclosing On 500 kV Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 100, pp. 1512-1515, Abr.1981.
15. M. E. Zevallos A., "Redução das máximas correntes de arco secundário para sistemas de transmissão típicos durante a manobra de abertura monopolar", Anais do XIV Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ - XIV ERIAC, Foz do Iguaçu, PR, Mai.2011.
16. E. Kuffel, "High voltage engineering". Oxford, Inglaterra: Pergamon Press, 1984.
17. J.R. Reitz, "Foundation of electromagnetic theory", Reading, EUA: Addison-Wesley, 1967.
18. D.E. Hedman, "Insulation coordination", Schenectady, EUA: Power Technologies, 1973.
19. L. Prikler, "Improved Secondary Arc Models Based on Identification of Arc Parameters from Staged Fault Test Records", Power System Computation Conference, Sevilla, Espanha, Jun.2002.
20. Wikipedia, "Modelo Científico", em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_científico, acesso em 22 de julho de 2012.
21. C.J. Dupont. "Análise Determinística de Arco Elétrico", dissertação de mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1992.
22. A. S. Camara. "Single-pole autoreclosure studies: secondary arc model research including a 500 kV line experimental circuit", International Conference on High Voltage Engineering, Chongqing, China, 2008.
23. A.R.C. Warrington, "Reactance relays negligibly affected by arc impedance", Electrical World, pp.502-505, Set. 1931.
24. A.P. Strom, "Long 60-Cycle Arcs in Air", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol.65, pp.113-118, Mar.1946.
25. G. Yaozhong, "Prediction Methods for Preventing Single-Phase Reclosing on Permanent Fault", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, No.1, Jan.1989.
26. M.D. Woodford, "Secondary Arc Effects in AC/DC Hybrid Transmission", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, No.2, Abr.1993.
27. A.T. Johns, "Improved Techniques for Modelling Fault Arcs On Faulted EHV Transmission Systems", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol.141, No.2, Mar.1994.

28. M.B.Djuric, "A New Approach to the Arcing Faults Detection for Fast Autoreclosure in Transmission Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.4, Out.1995.
29. Y. Goda, "Arc Voltage Characteristics of High Current Fault arcs in Long Gaps", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.2, Abr.2000.
30. G. Bán, "Testing EHV Secondary Arcs", IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, Set.2001.
31. V.V. Terzija, "On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.3, pp.1012-1017, Jul. 2004.
32. A.A. Montanari, "Religamento Monopolar Adaptativo Rápido Baseado na Assinatura Harmônica da Tensão de Arco Secundário", dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas-SP, 2009.
33. A.A. Montanari, "Secondary Arc Voltage and Current Harmonic Content for Field Tests Results", International Conference on Power Systems Transients, Kyoto, Japão, Jun. 2009.
34. G.B. Santos, "Visual Evaluation of the Length of Artificially Generated Electrical Discharges By 3D-snakes", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No.1, pp.200-210, Fev 2011.
35. A.S. Maikapar, "Extinction of an Open Electric Arc", Elektrichestvo, Vol.4, pp.64-69, 1960.
36. B. Thorén, "Arcs on overhead lines and in switchgears", Elteknik, pp.139-143, 1962.

APÊNDICES

APÊNDICE A

TENSÃO E CORRENTE DE ARCOS ELÉTRICOS

Este apêndice traz resultados complementares da corrente sustentada do arco e da tensão entre os terminais do arco referentes a ensaios de arco secundário realizados em campo, descritos no capítulo 4. Devido ao grande número de ensaios analisados (647), apenas os resultados de um ensaio da classe 200 A_{ef}, foi exemplificado na seção 5.1. Aqui serão expostos os resultados de um ensaio para cada uma das demais classes analisadas no trabalho, especificamente: 15 A_{ef}, 20 A_{ef}, 30 A_{ef}, 50 A_{ef}, 60 A_{ef}, 100 A_{ef}, 150 A_{ef}, 300 A_{ef}, 500 A_{ef}, 1000 A_{ef}, 3000 A_{ef}, 5000 A_{ef} e 10.000 A_{ef}.

Para cada ensaio os resultados dos sinais de corrente e de tensão serão apresentados concomitantemente, mediante um gráfico que abrange todo o ensaio (1 segundo) e outra figura constituída por 10 gráficos que ilustram a figura anterior a cada 100 ms, permitindo uma melhor análise das formas de onda.

Os resultados são apresentados a seguir:

➤ **Ensaio classe 15 A_{ef}**

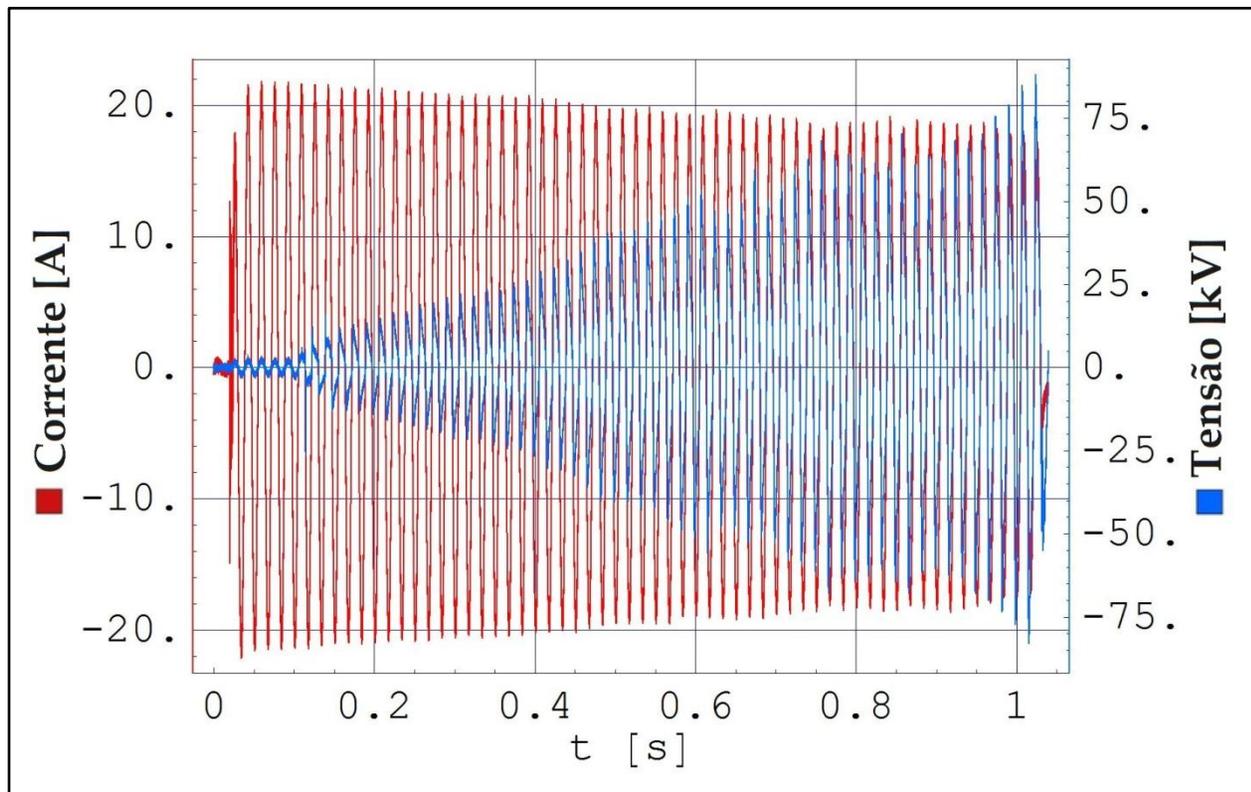


Figura A.1: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 15 A_{ef} .

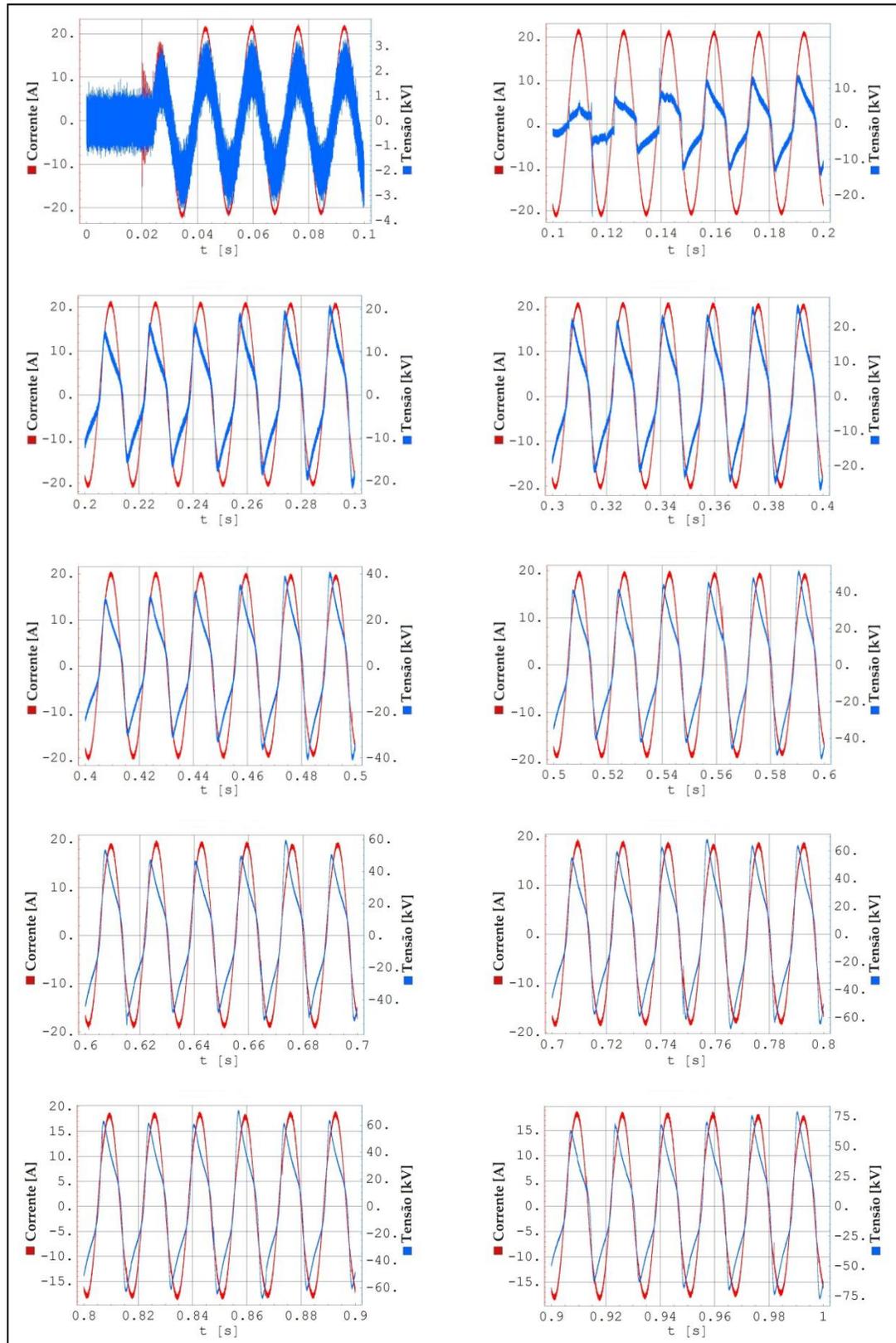


Figura A.2: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 15 A_{er} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 20 A_{ef}**

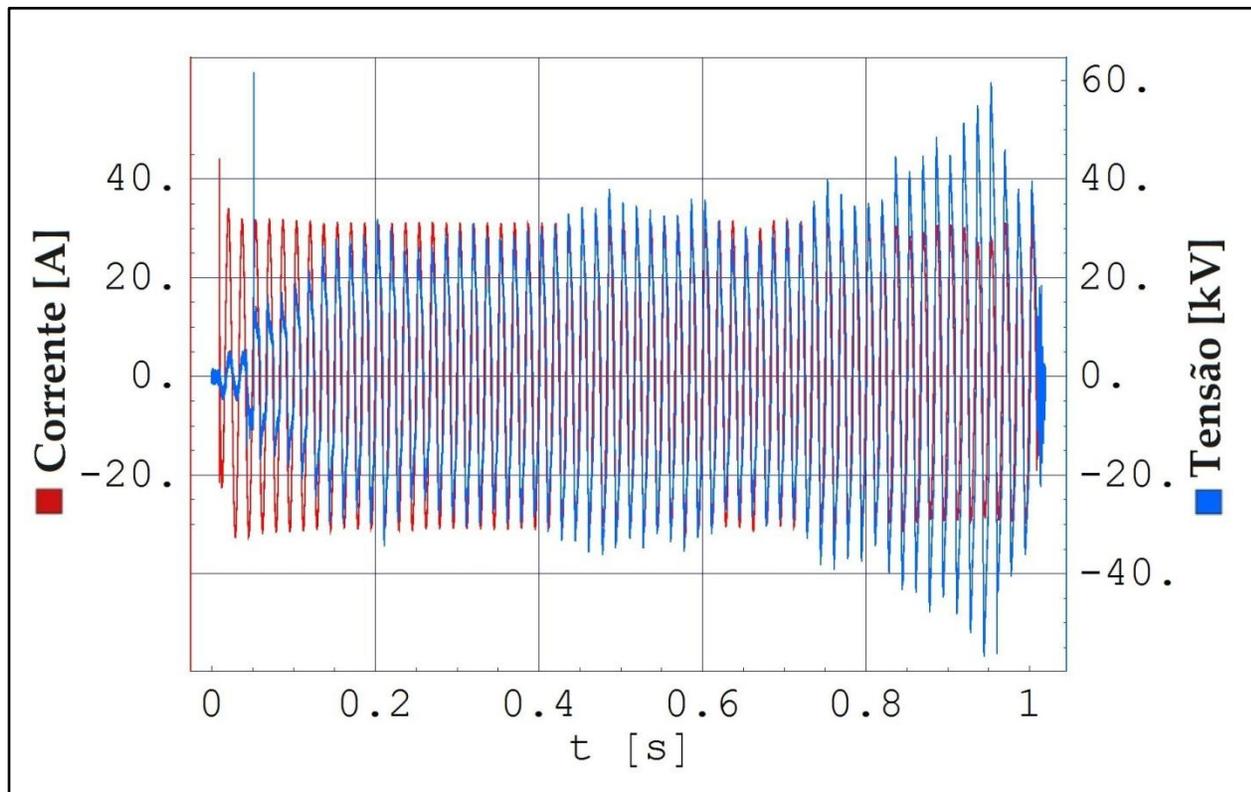


Figura A.3: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 20 A_{ef}.

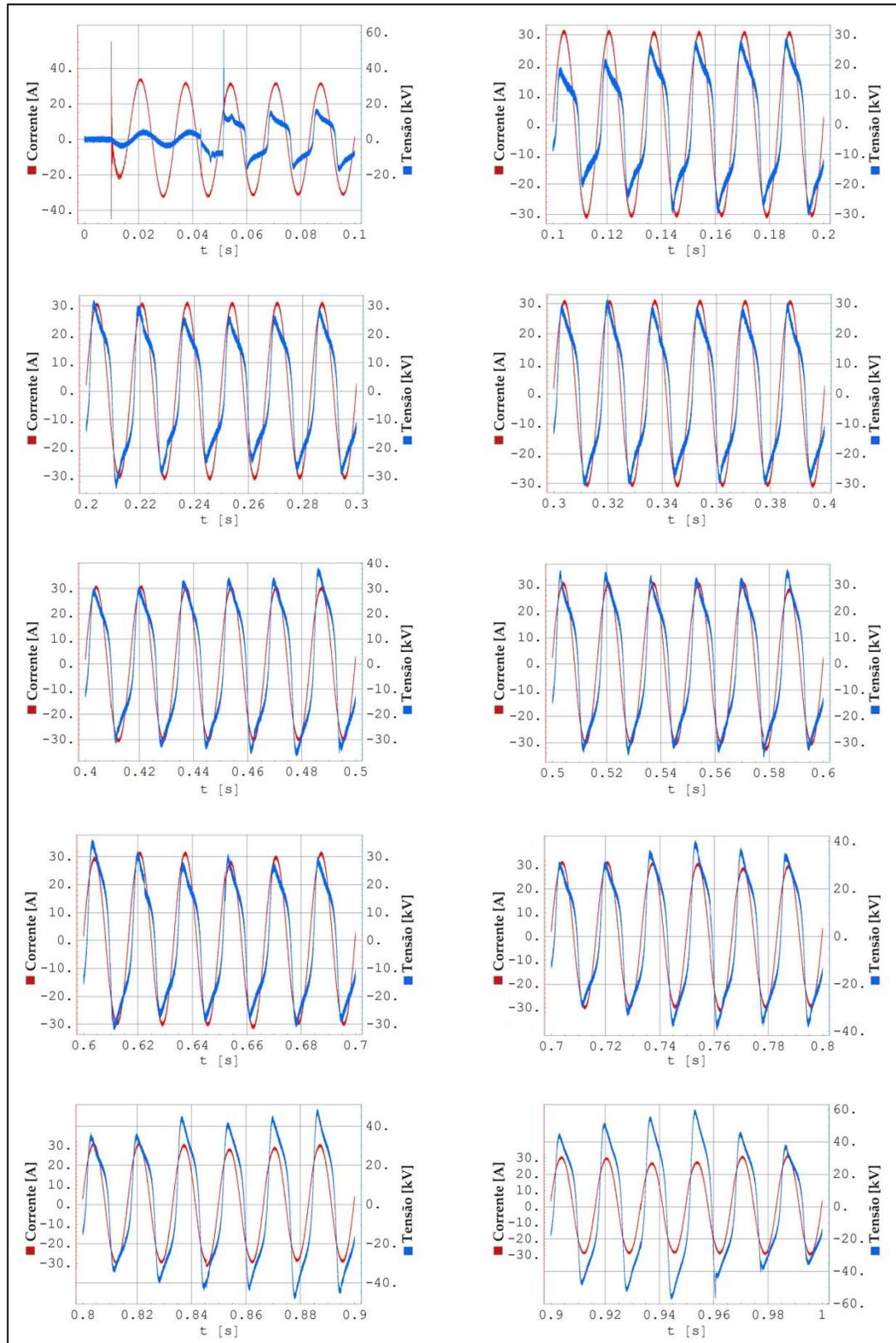


Figura A.4: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 20 A_{er} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 30 A_{ef}**

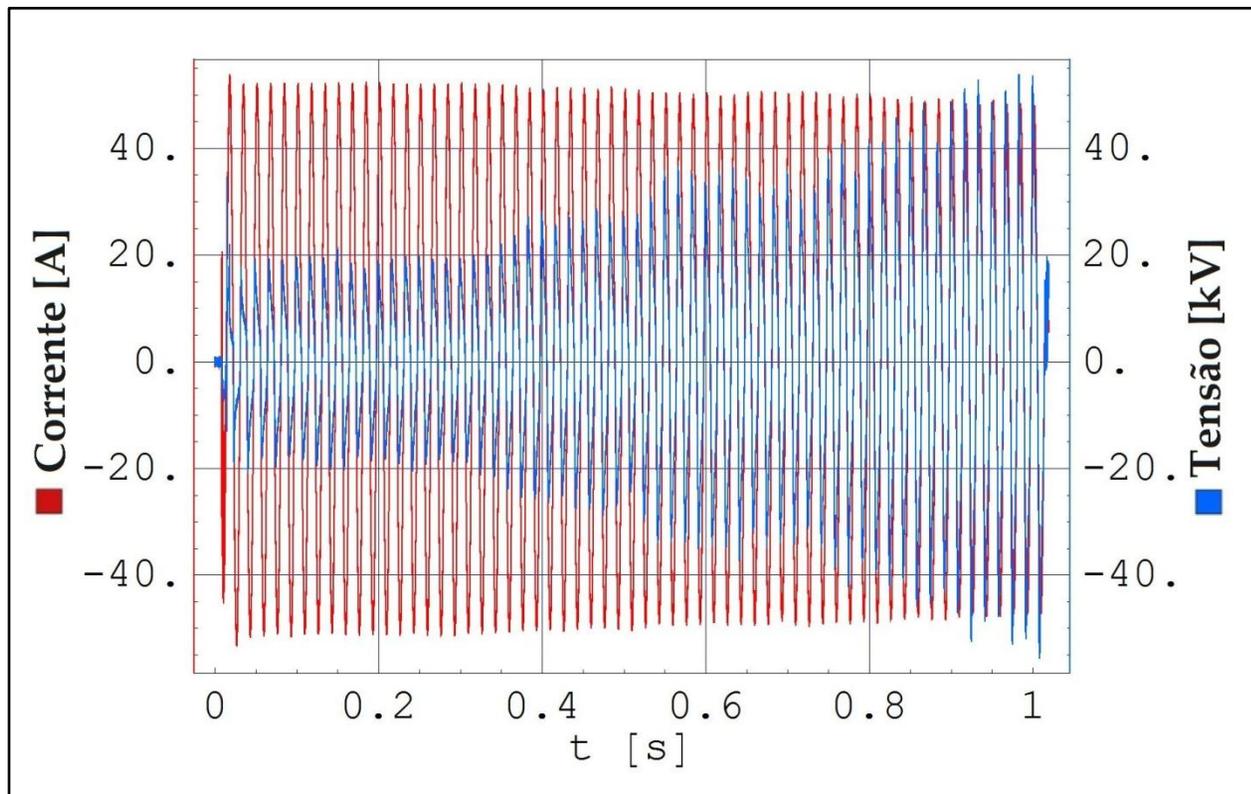


Figura A.5: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 30 A_{ef}.

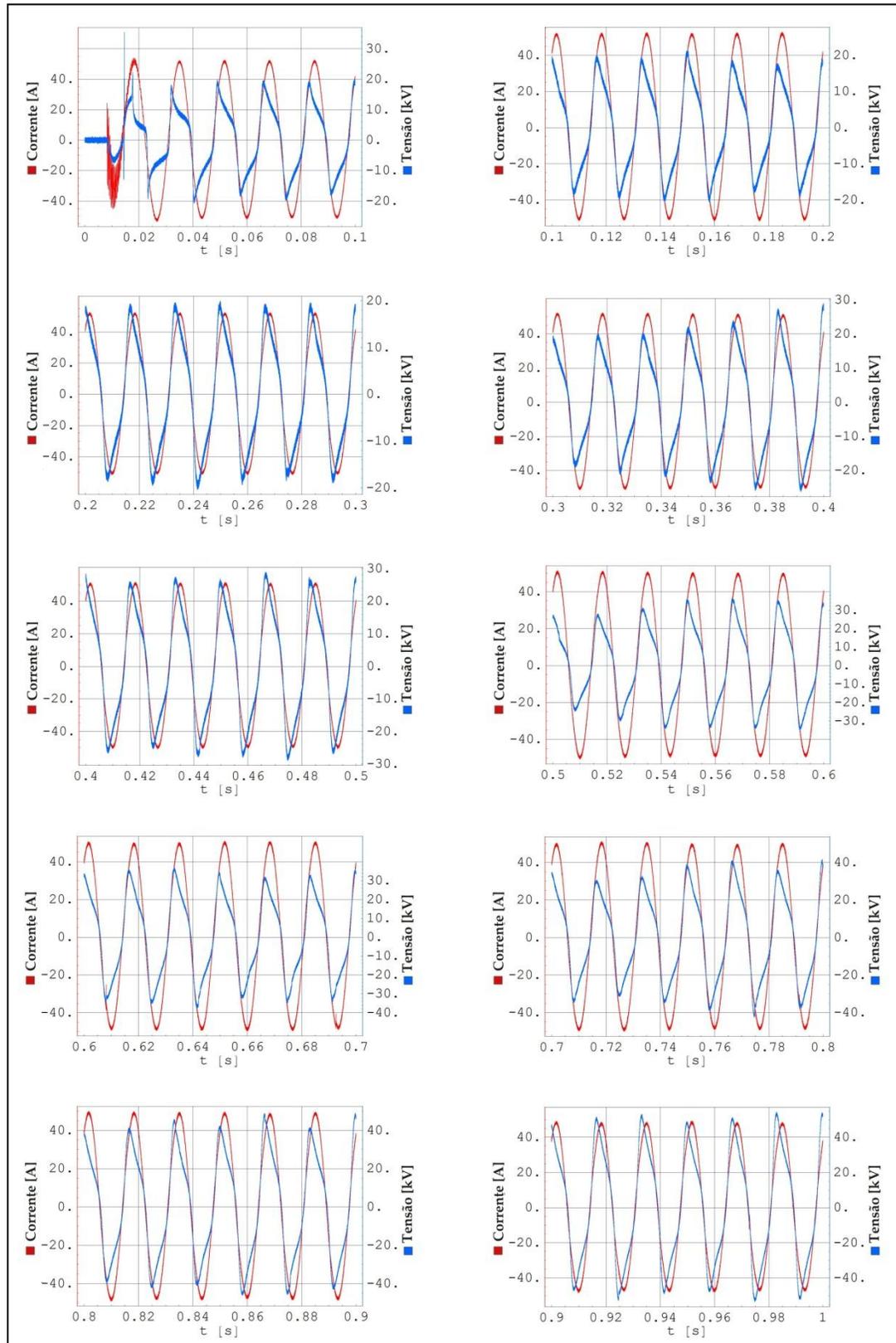


Figura A.6: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 30 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 50 A_{ef}**

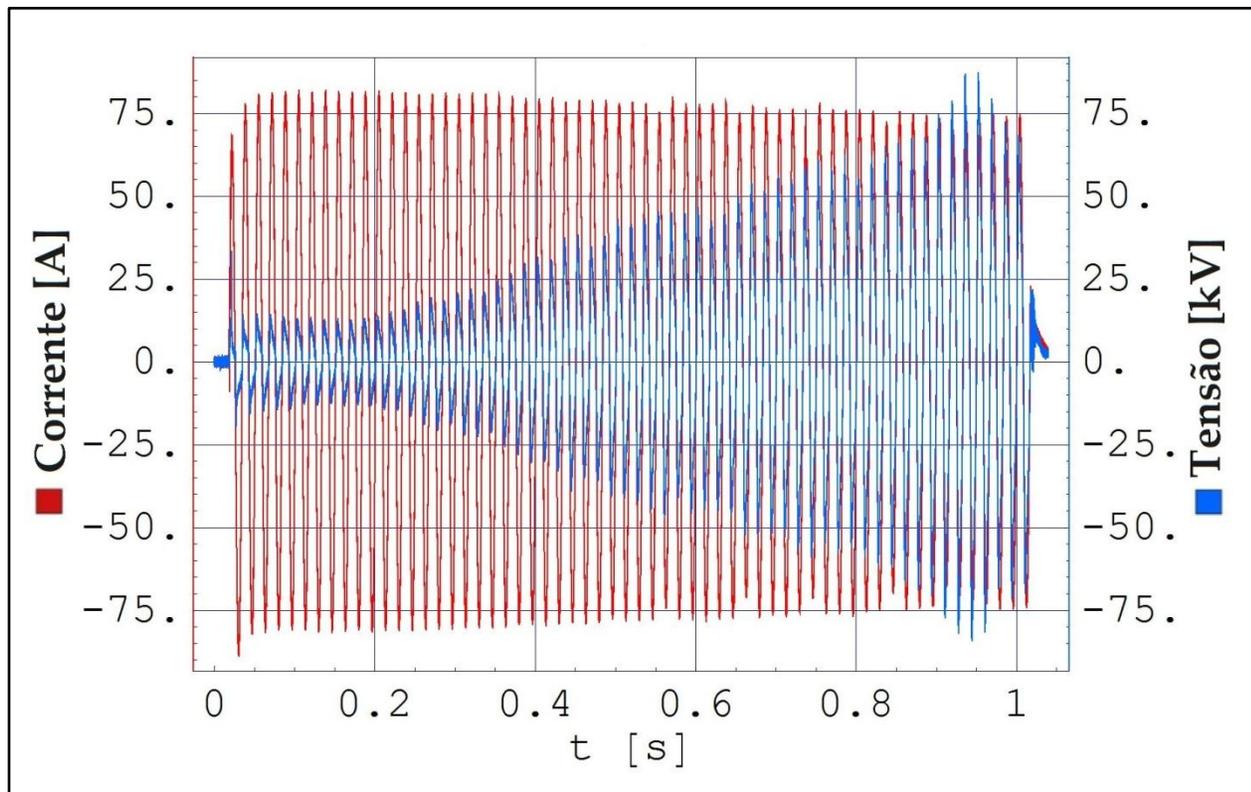


Figura A.7: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 50 A_{ef} .

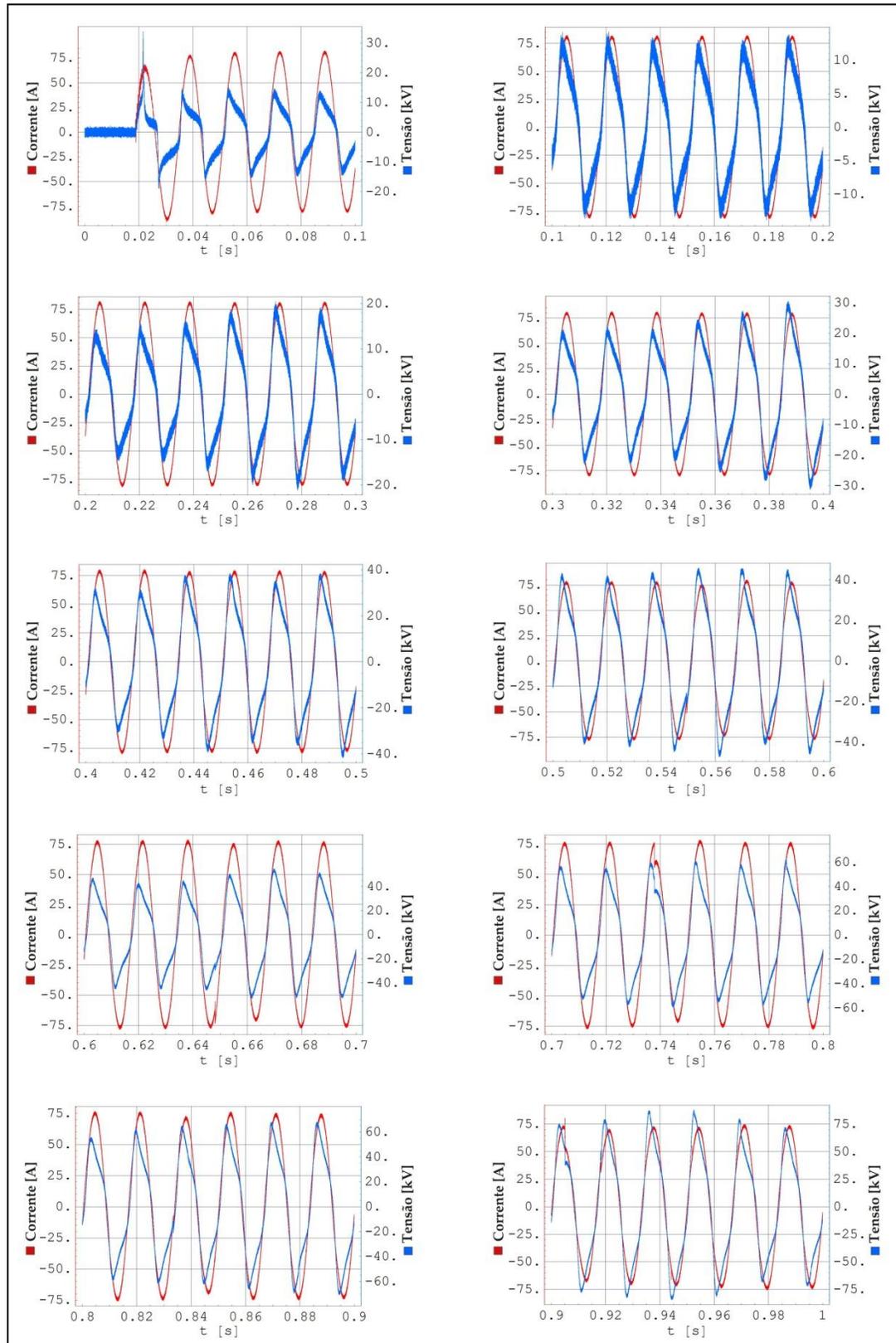


Figura A.8: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 50 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 60 A_{ef}**

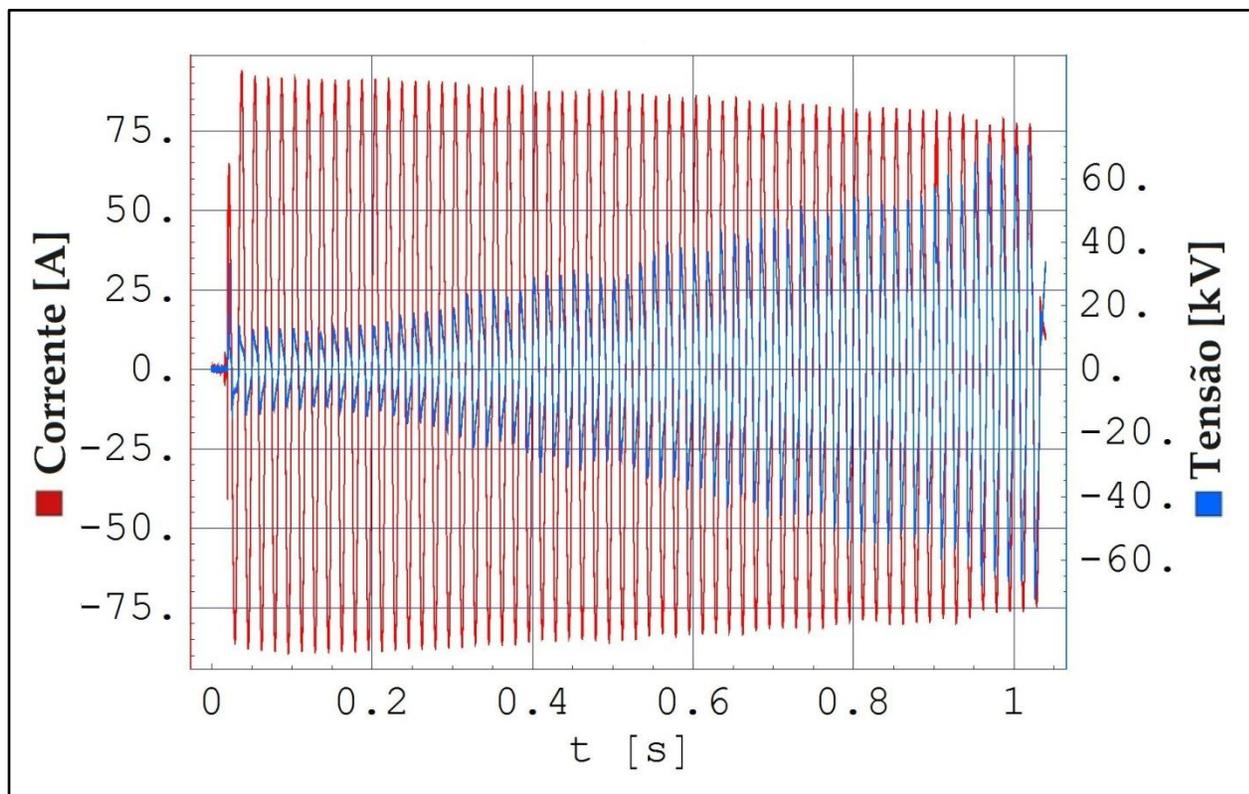


Figura A.9: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 60 A_{ef} .

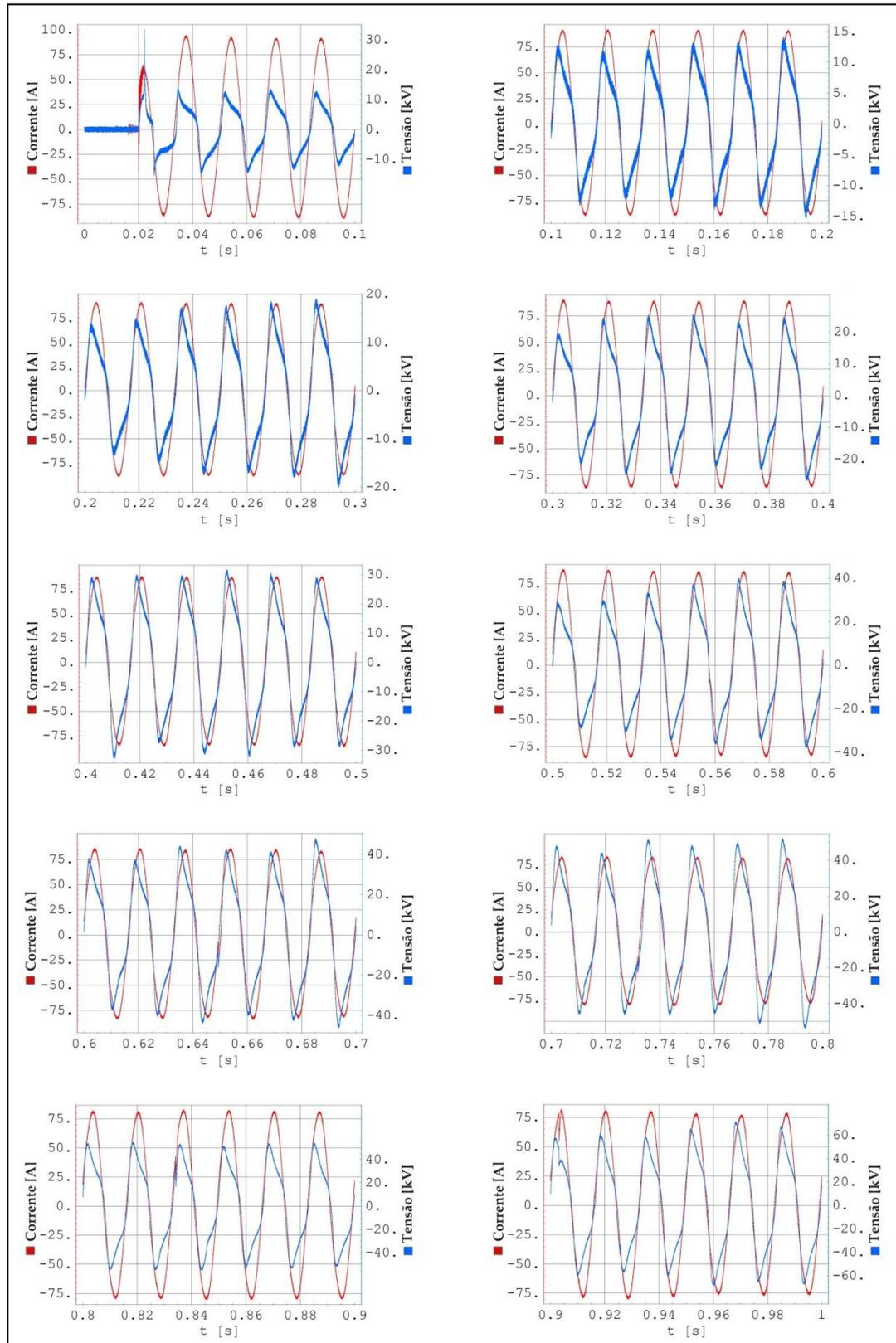


Figura A.10: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 60 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 100 A_{ef}**

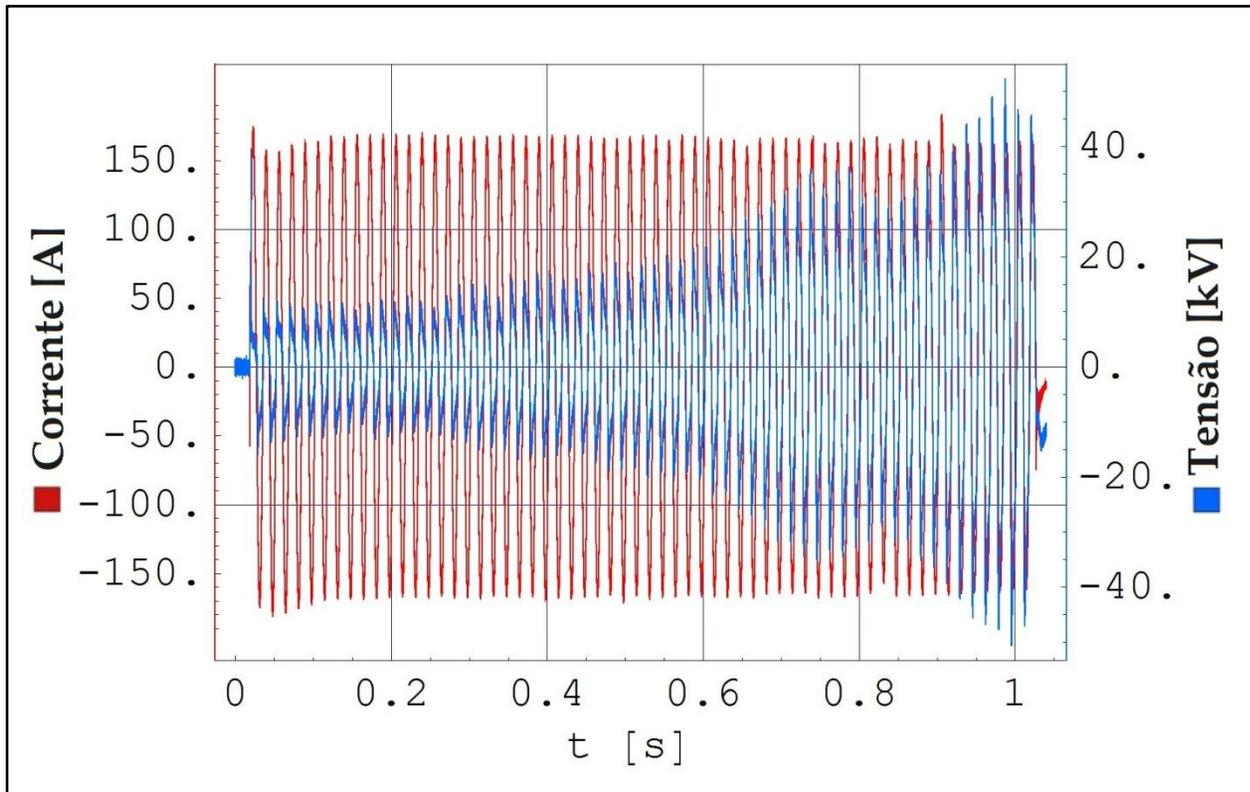


Figura A.11: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 100 A_{ef}.

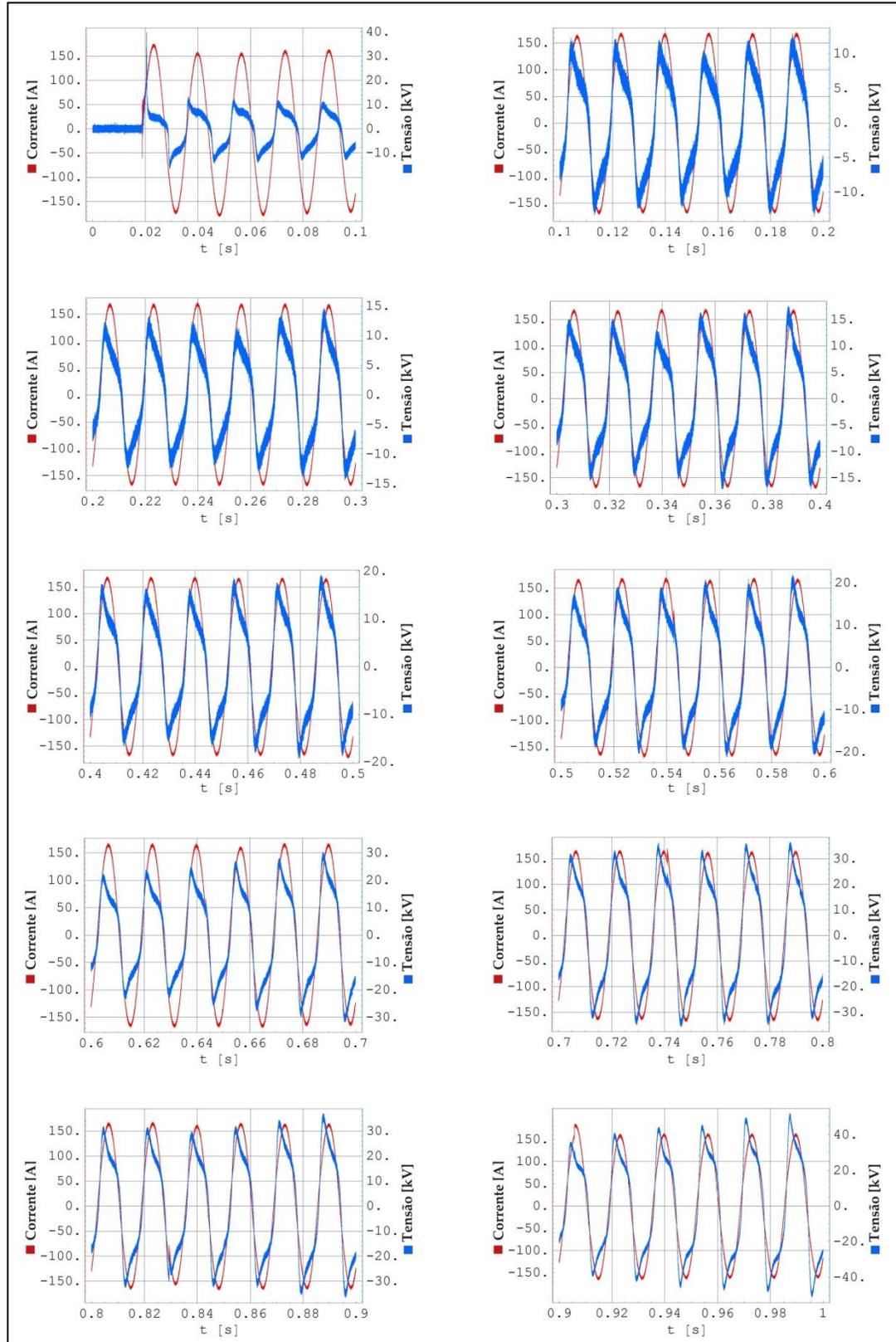


Figura A.12: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 100 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 150 A_{ef}**

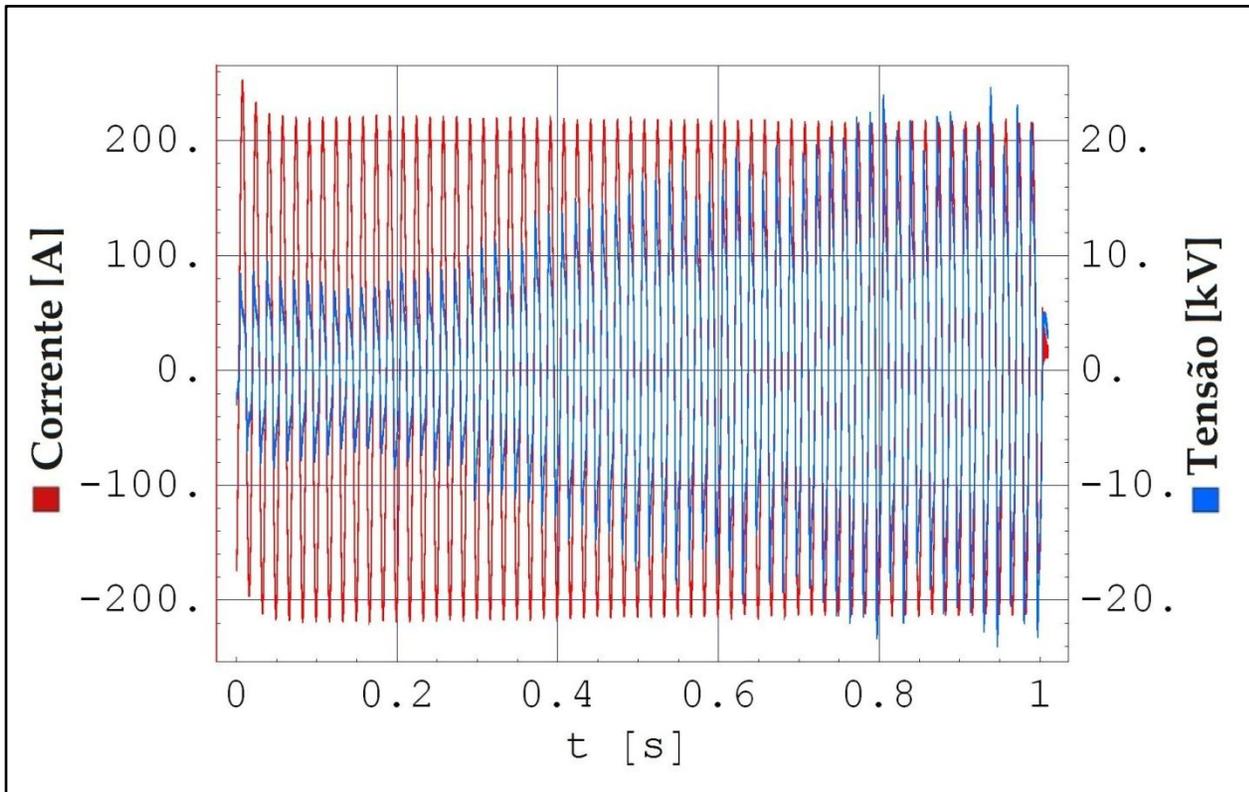


Figura A.13: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 150 A_{ef}.

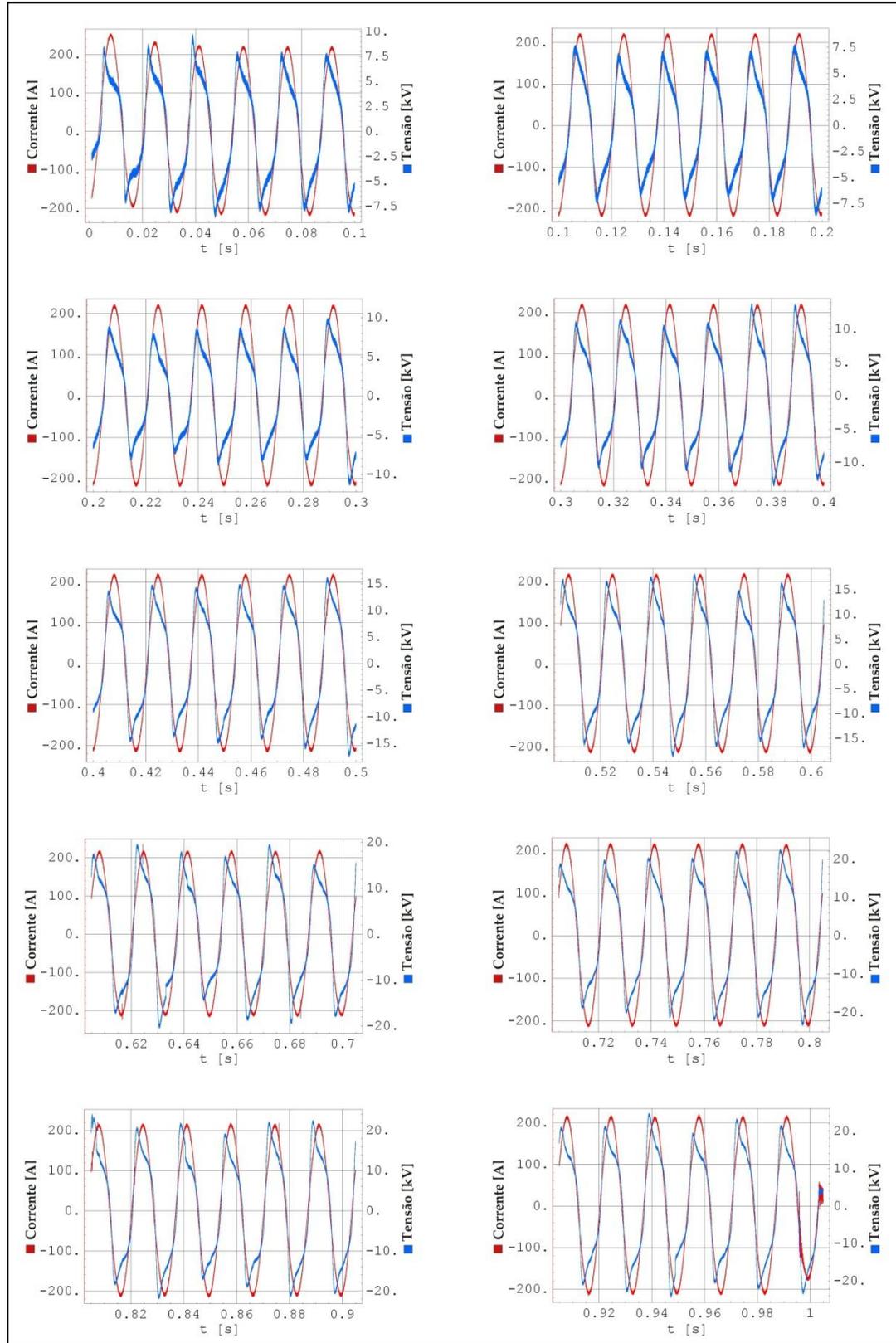


Figura A.14: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 150 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 300 A_{ef}**

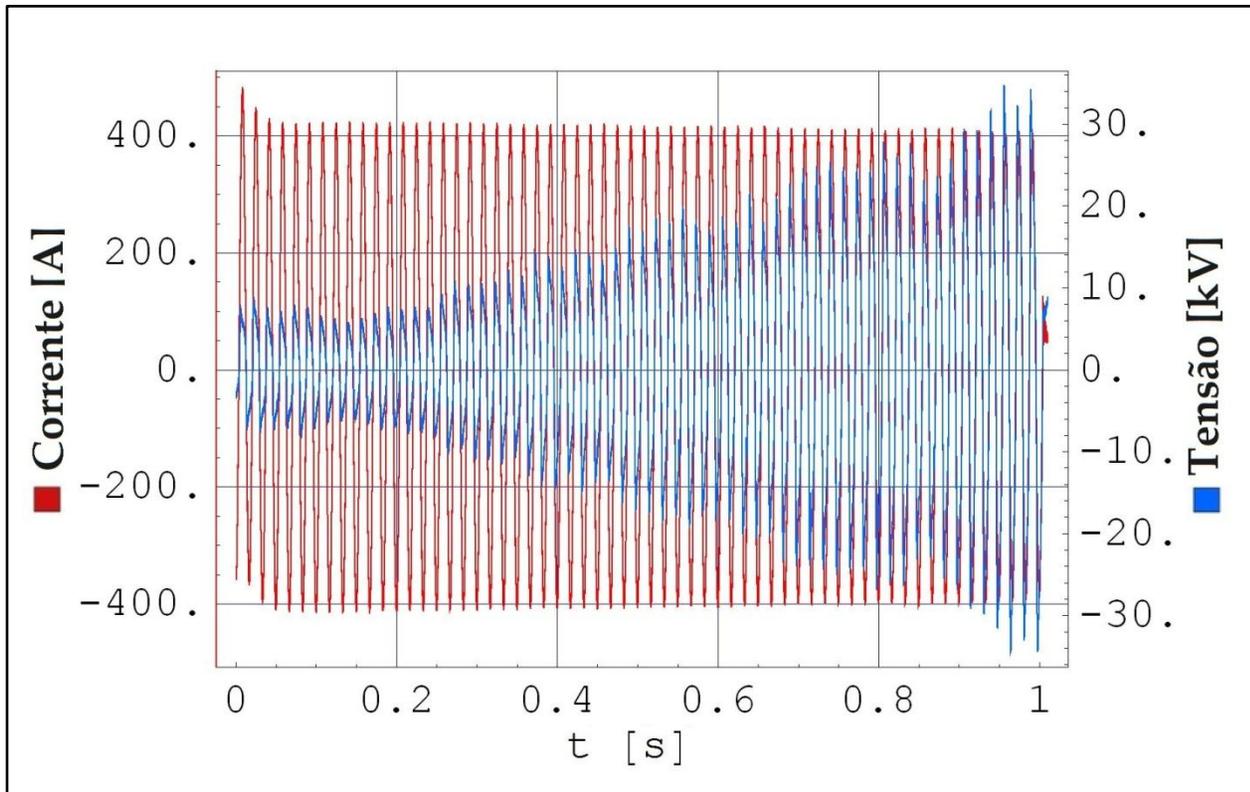


Figura A.15: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 300 A_{ef}.

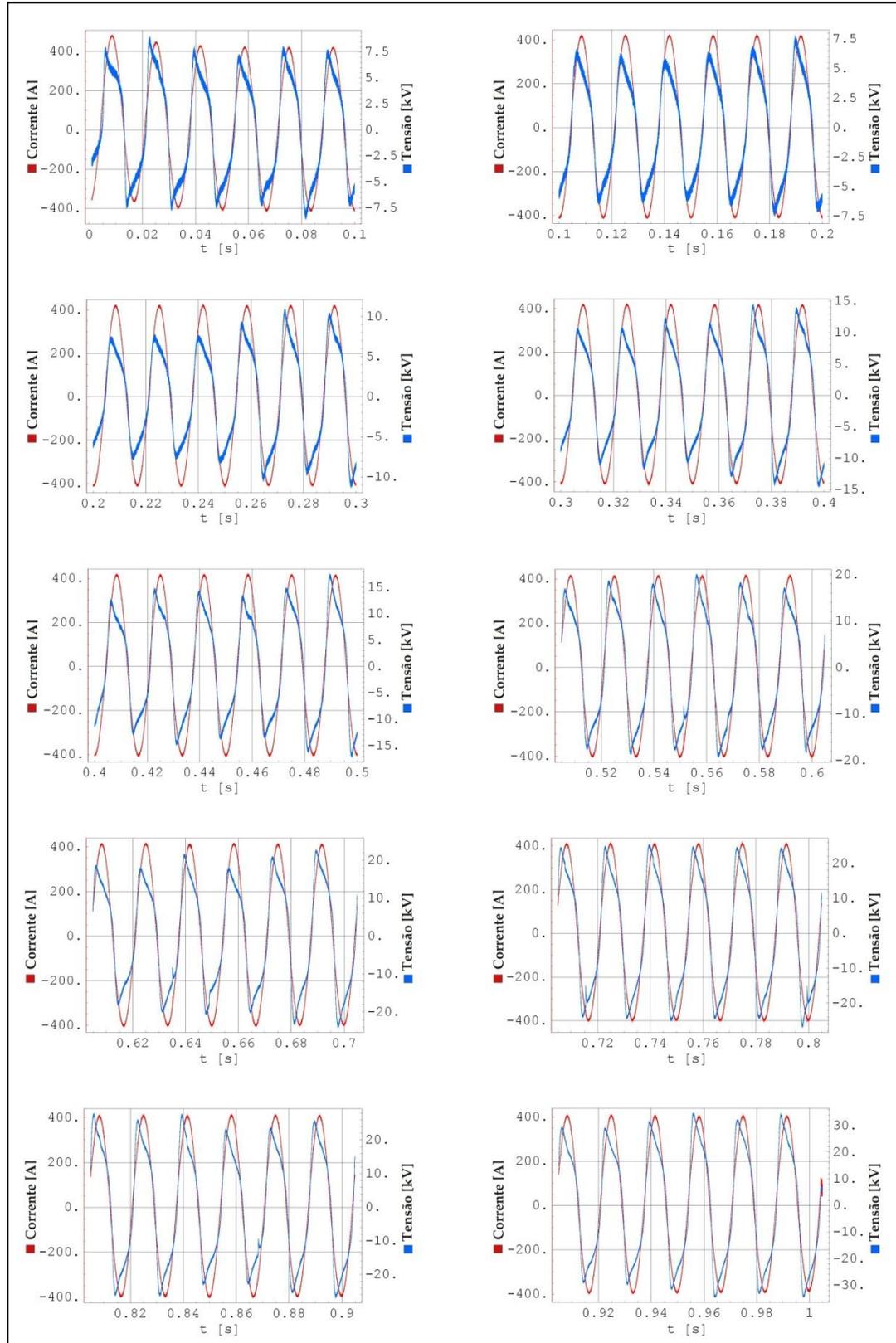


Figura A.16: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 300 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 500 A_{ef}**

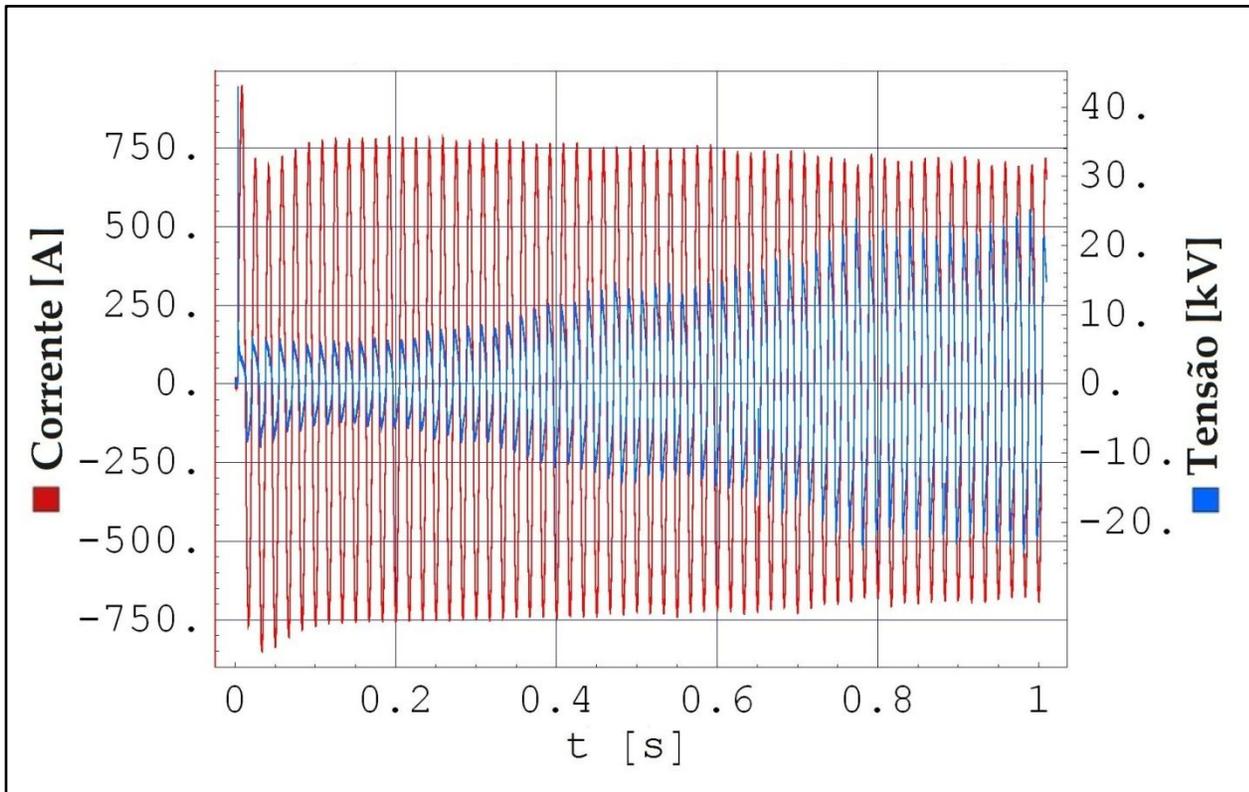


Figura A.17: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 500 A_{ef}.

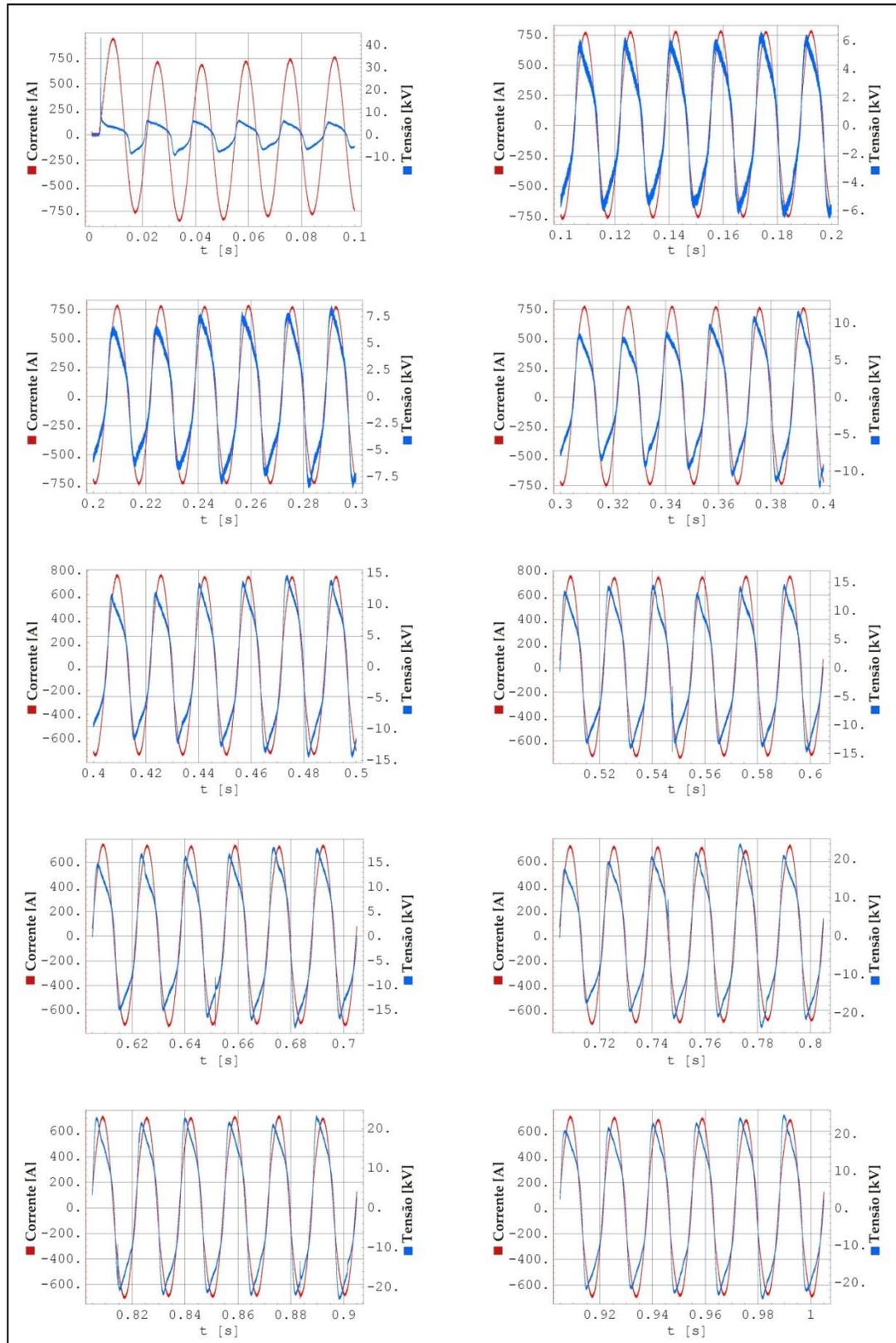


Figura A.18: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 500 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 1.000 A_{ef}**

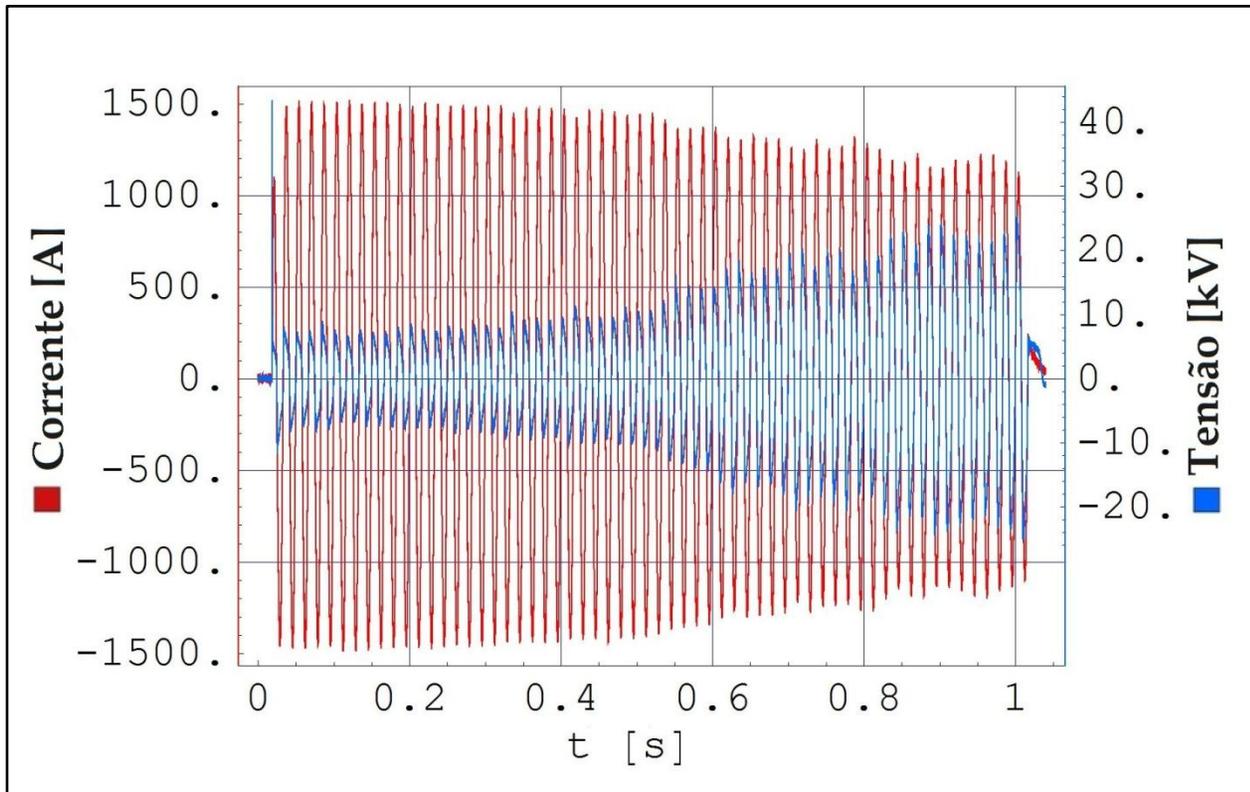


Figura A.19: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 1.000 A_{ef}.

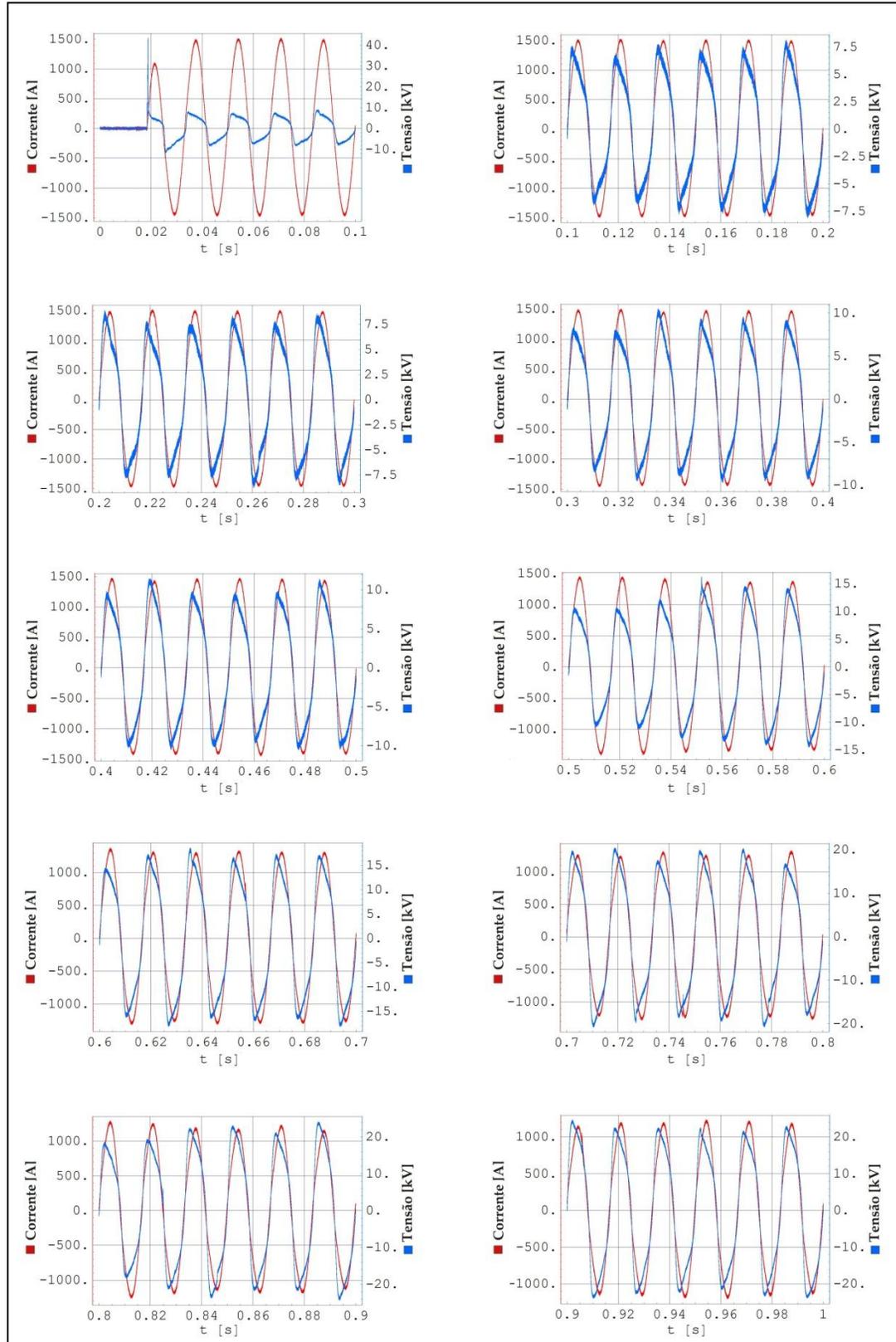


Figura A.20: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 1.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 3.000 A_{ef}**

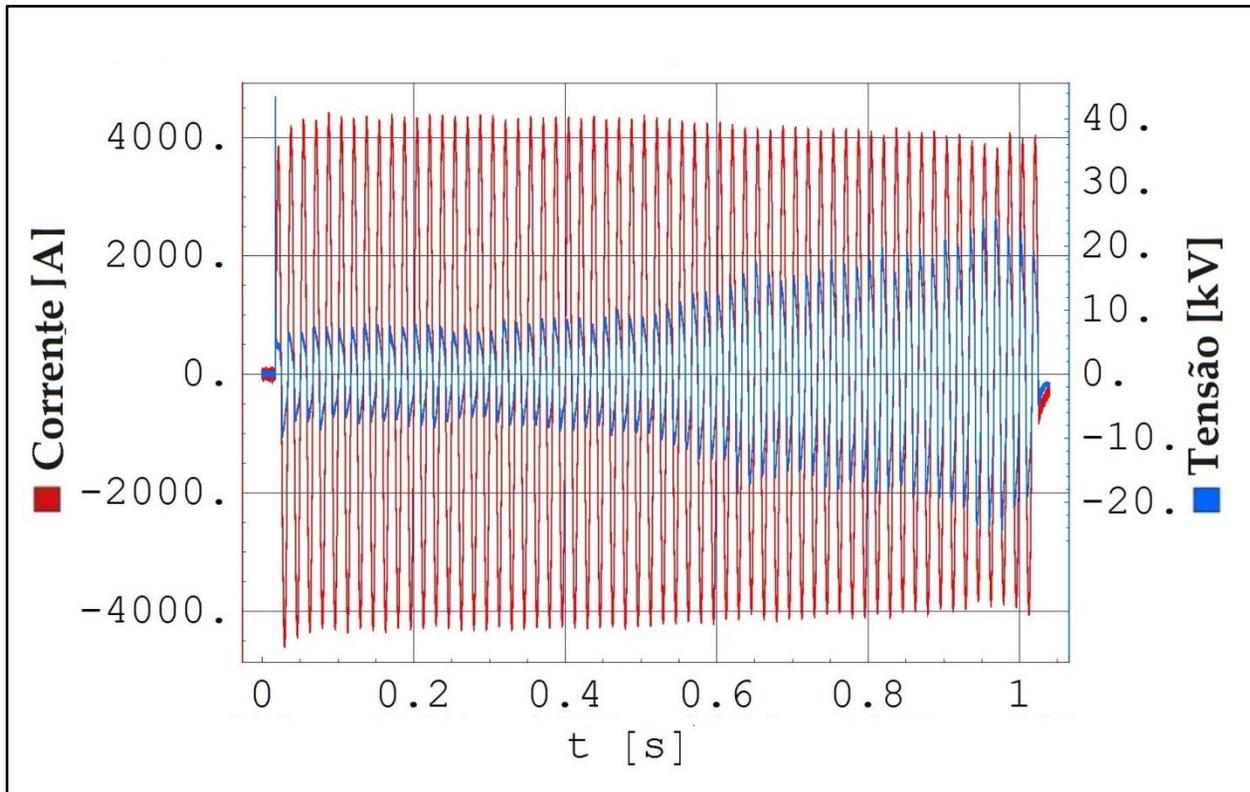


Figura A.21: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 3.000 A_{ef}.

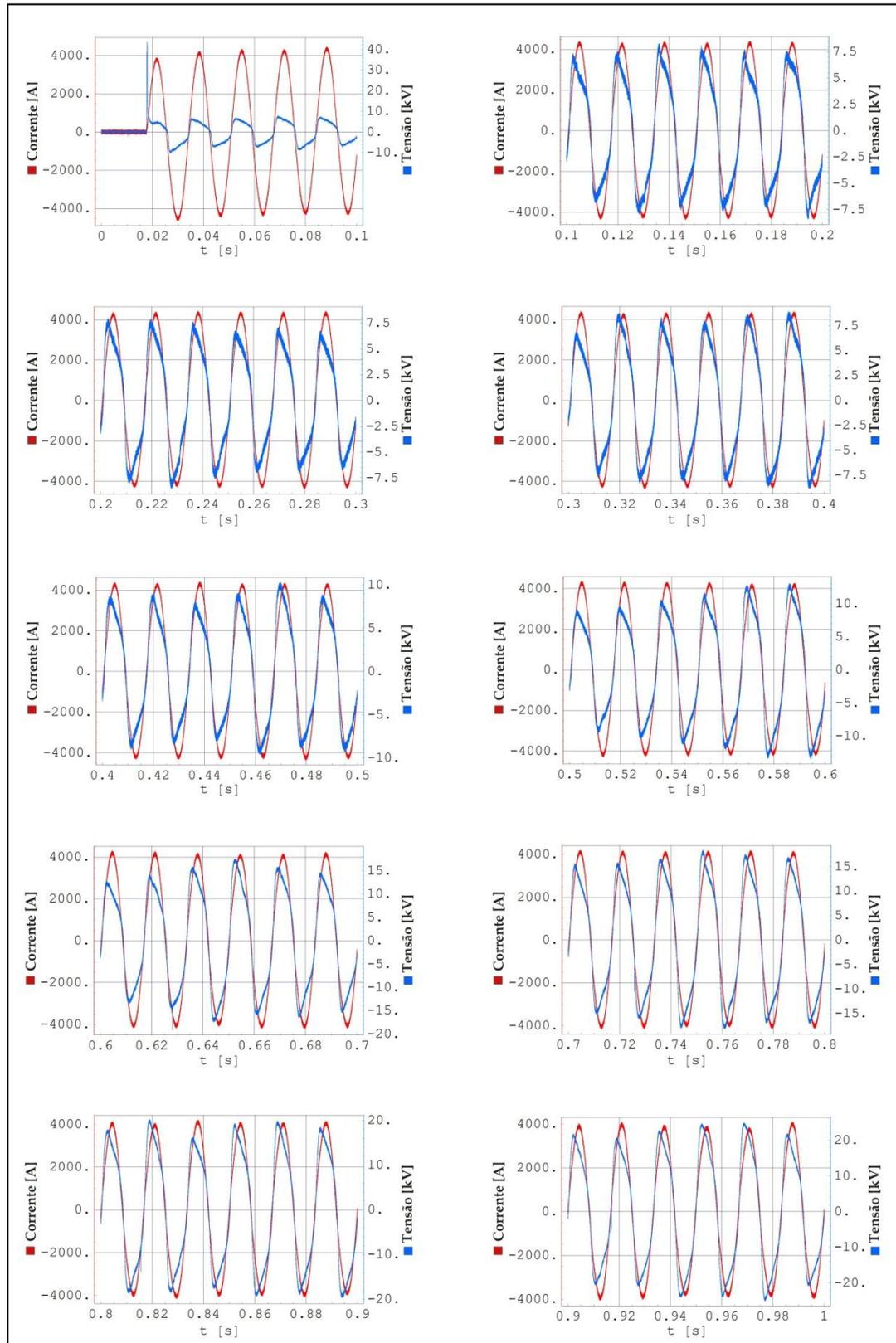


Figura A.22: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 3.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 5.000 A_{ef}**

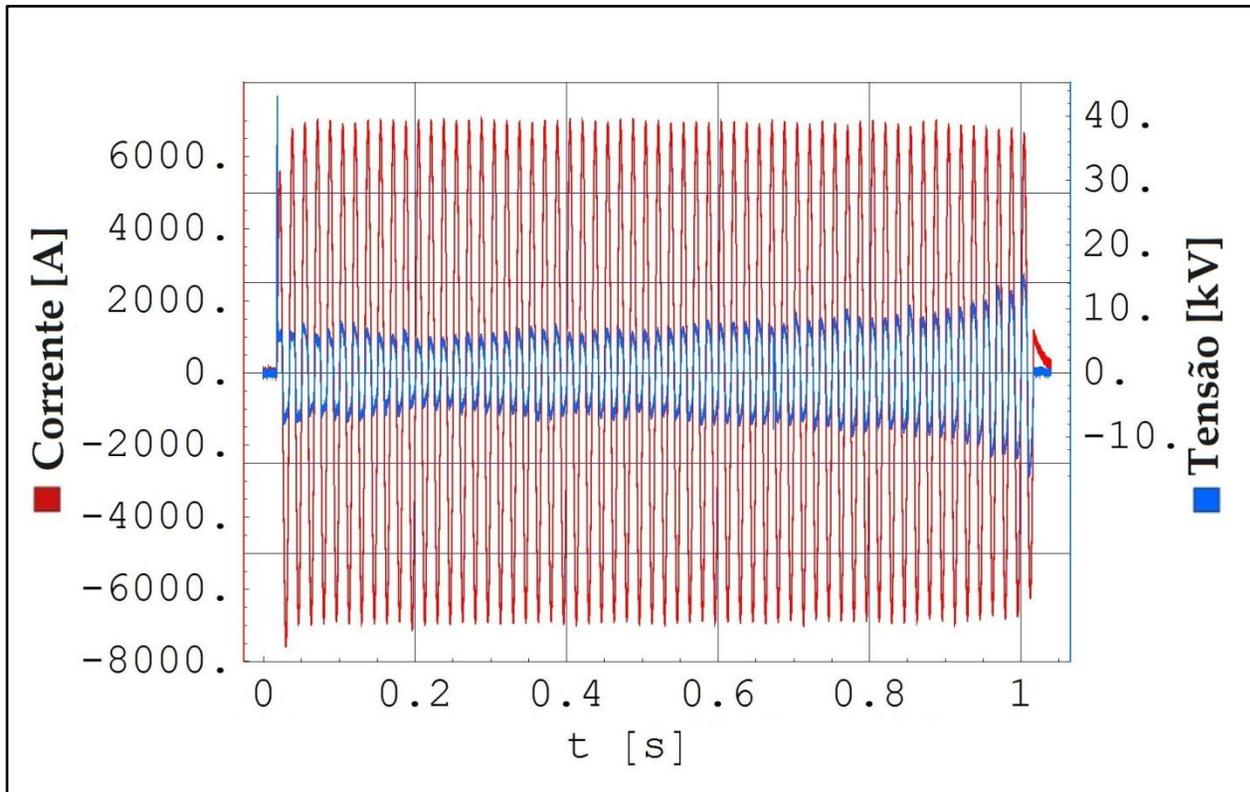


Figura A.23: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 5.000 A_{ef}.

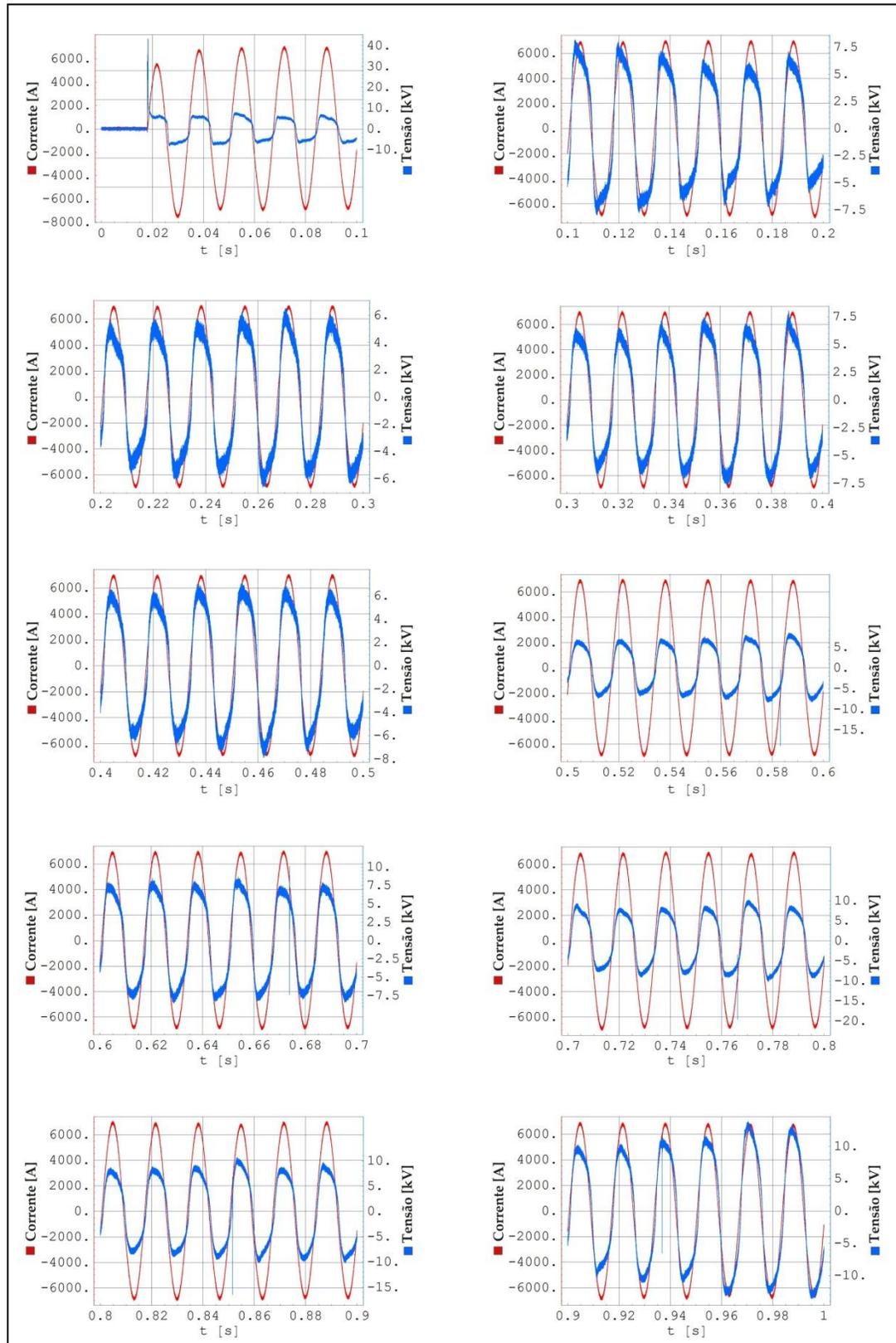


Figura A.24: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 5.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

➤ **Ensaio classe 10.000 A_{ef}**

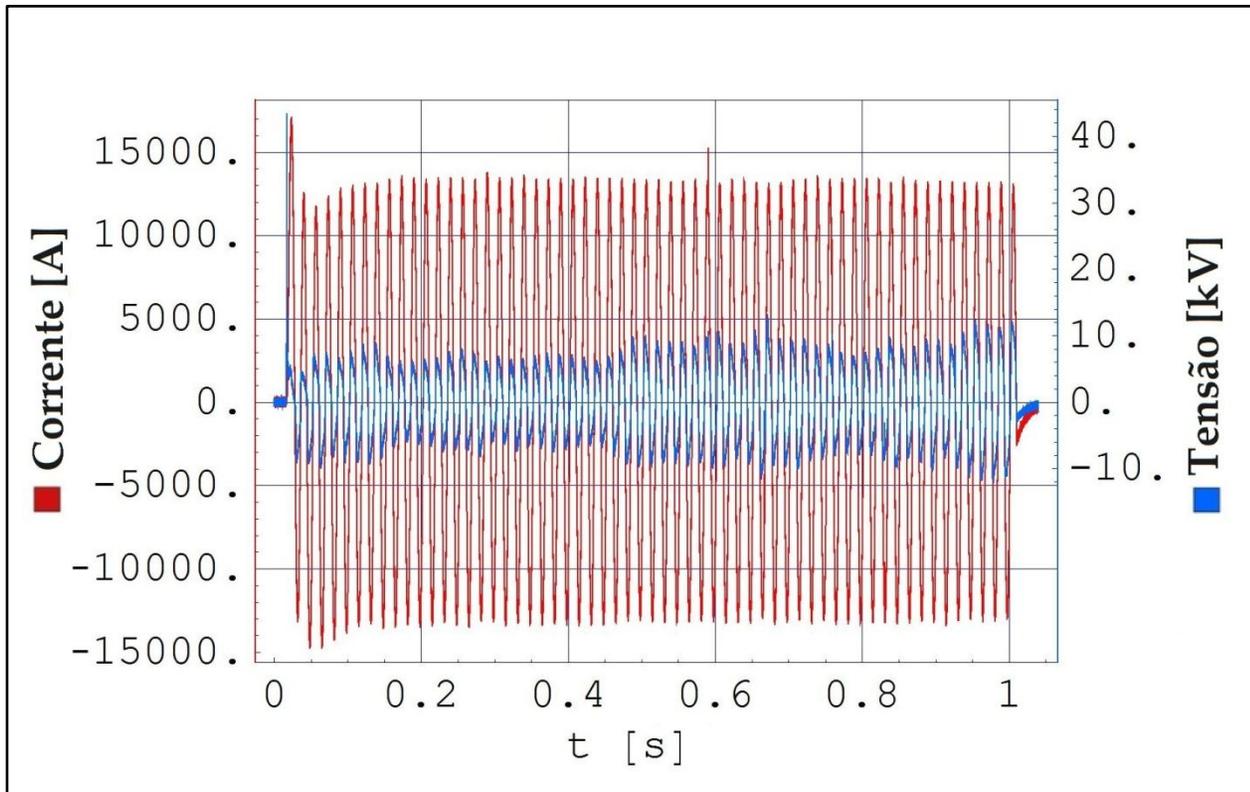


Figura A.25: Tensão e corrente sustentada de um ensaio em campo de arco classe 10.000 A_{ef}.

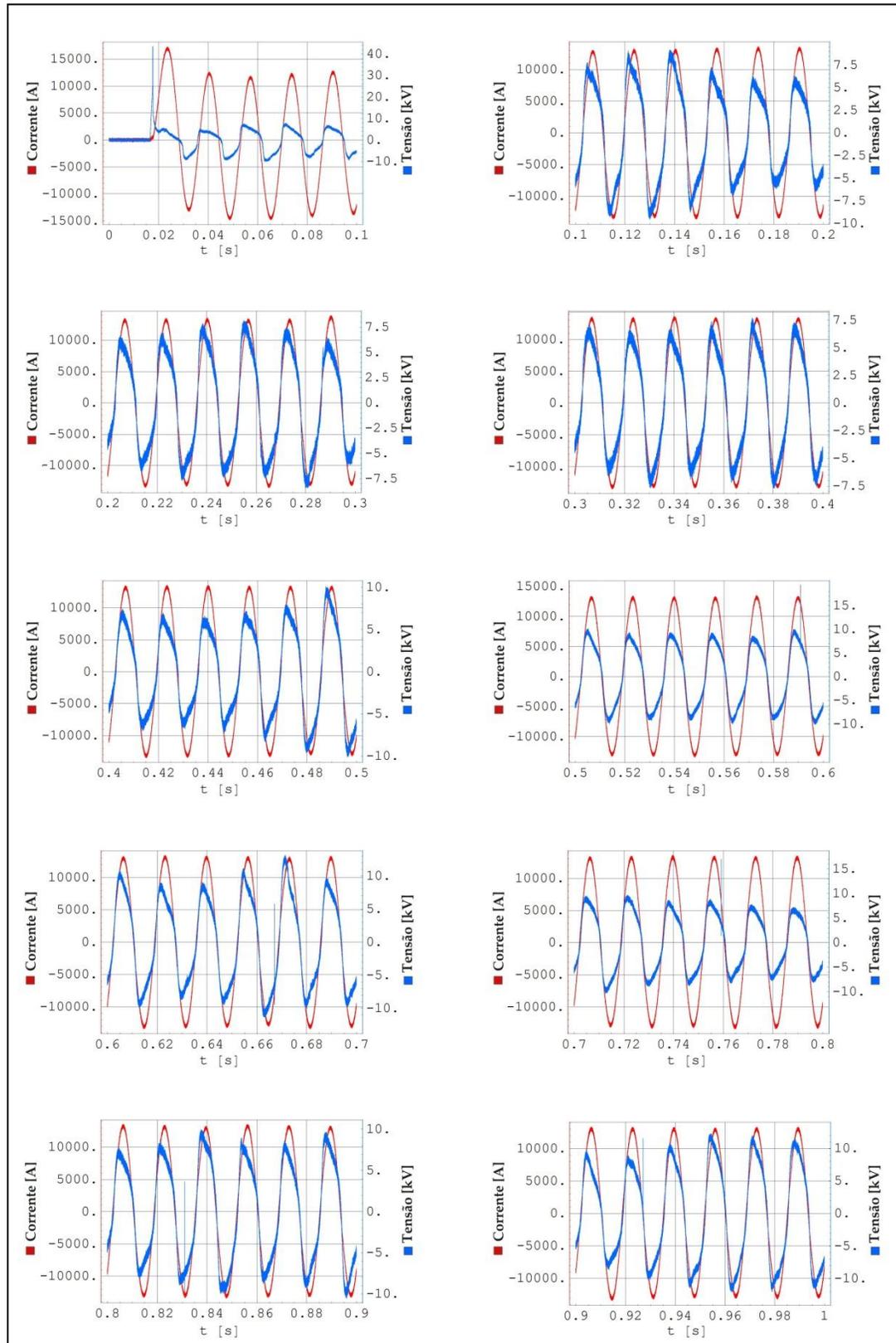


Figura A.26: Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco classe 10.000 A_{ef} de um ensaio em campo, detalhes a cada 100 ms.

APÊNDICE B

CONTÉUDO HARMÔNICO DA TENSÃO E DA CORRENTE DE ARCOS ELÉTRICOS

Neste apêndice são disponibilizadas figuras adicionais a respeito do conteúdo harmônico da corrente e da tensão entre os terminais dos arcos elétricos analisados. Tais resultados foram obtidos segundo a metodologia descrita na seção 5.2. Os ensaios escolhidos, representativos de cada uma das classes de corrente estudadas (15 A_{ef} , 20 A_{ef} , 30 A_{ef} , 50 A_{ef} , 60 A_{ef} , 100 A_{ef} , 150 A_{ef} , 300 A_{ef} , 500 A_{ef} , 1000 A_{ef} , 3000 A_{ef} , 5000 A_{ef} e 10.000 A_{ef}), correspondem aos mesmos ensaios apresentados no Apêndice A.

Para cada ensaio são exibidas as amplitudes das pseudo-harmônicas de primeira ordem de corrente e de tensão dos arcos elétricos. Também são expostas as relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas ímpares e pares e a pseudo-harmônica de primeira ordem correspondente.

Os resultados são apresentados a seguir:

➤ Ensaio classe 15 A_{ef}

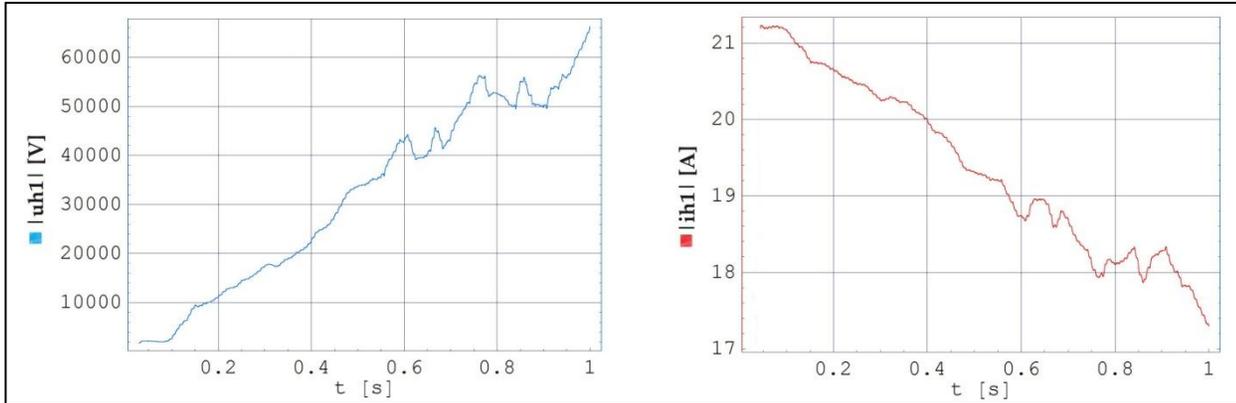


Figura B.1: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 15 A_{ef}.

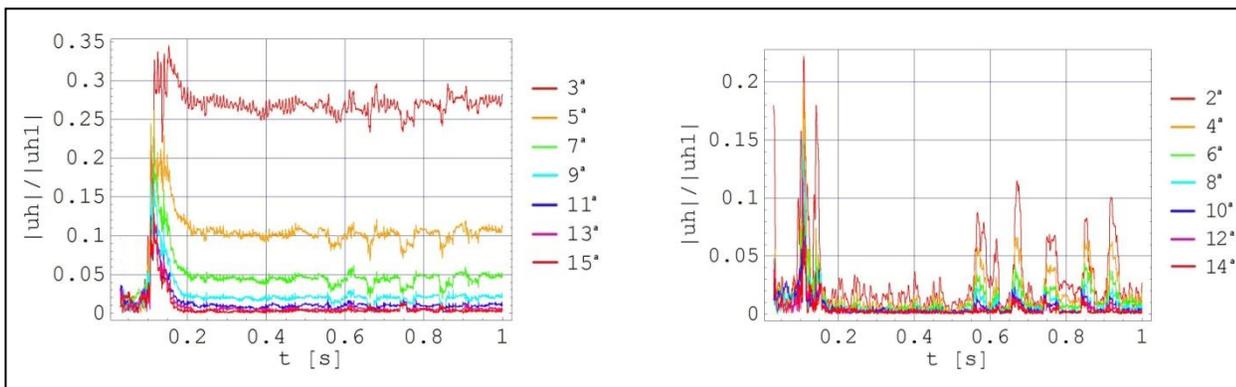


Figura B.2: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 15 A_{ef}.

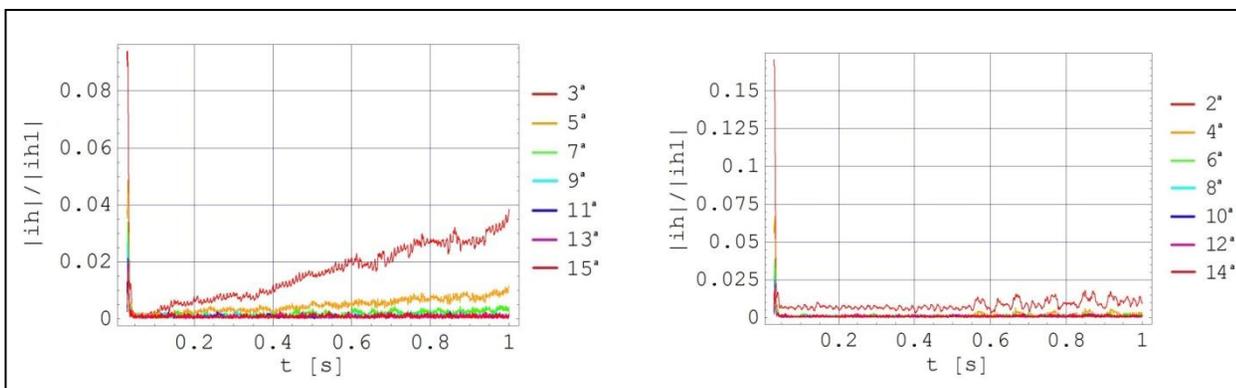


Figura B.3: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 15 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 20 A_{ef}

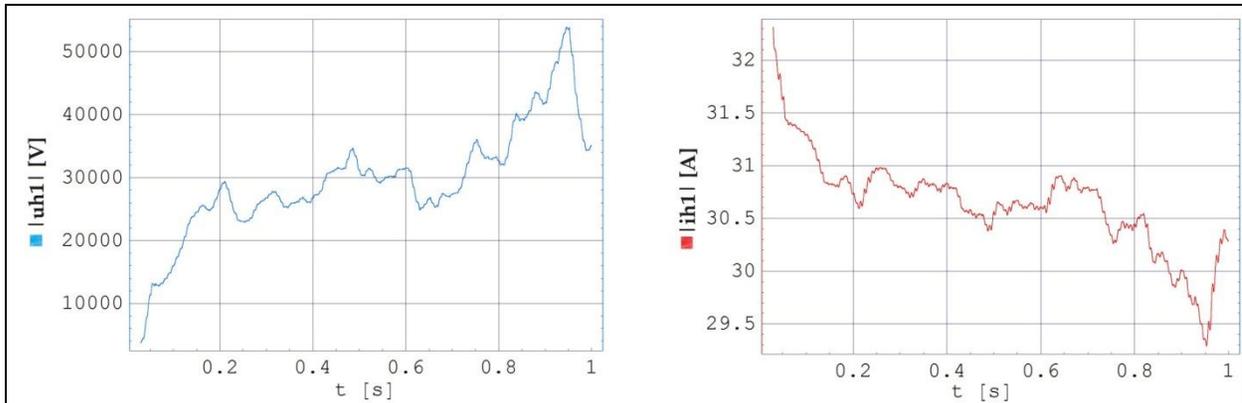


Figura B.4: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 20 A_{ef} .

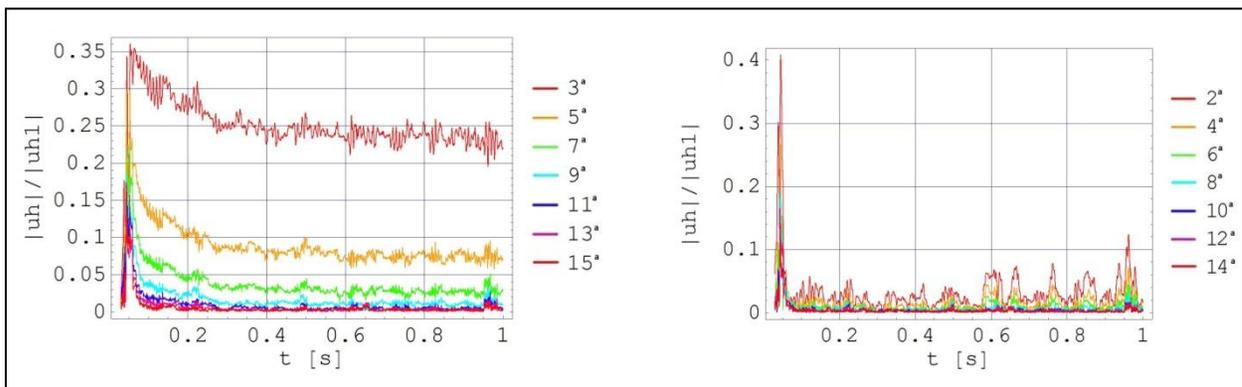


Figura B.5: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 20 A_{ef} .

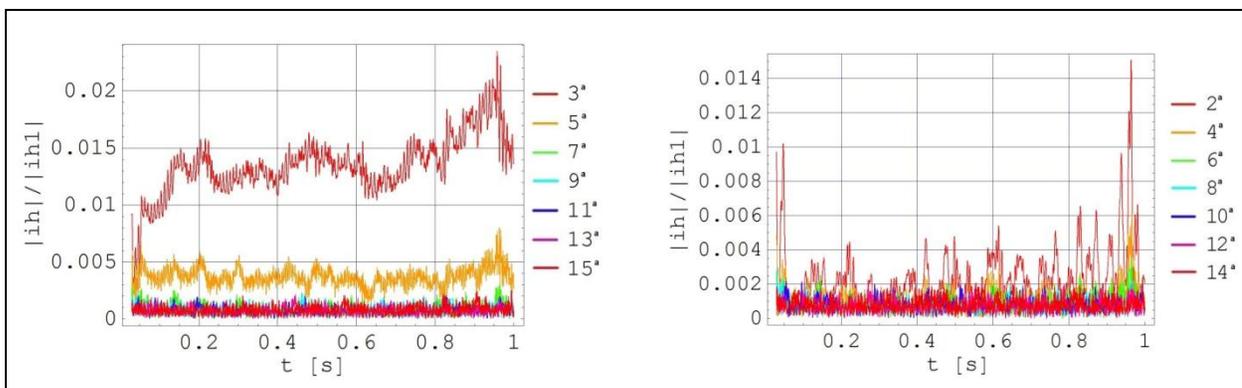


Figura B.6: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 20 A_{ef} .

➤ Ensaio classe 30 A_{ef}

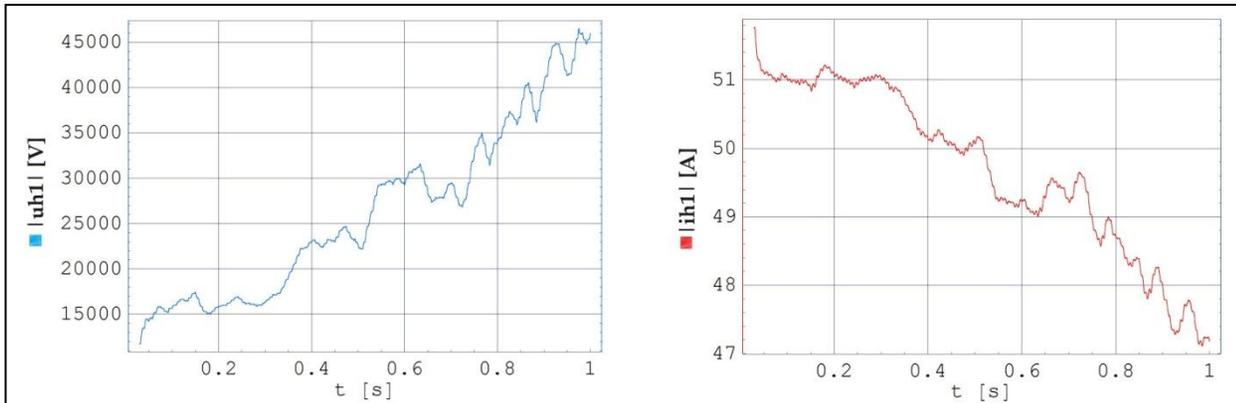


Figura B.7: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 30 A_{ef} .

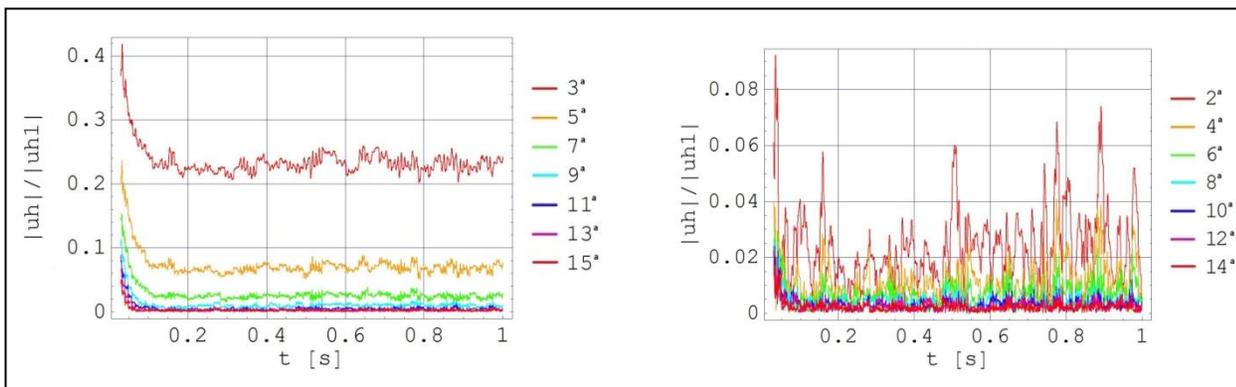


Figura B.8: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 30 A_{ef} .

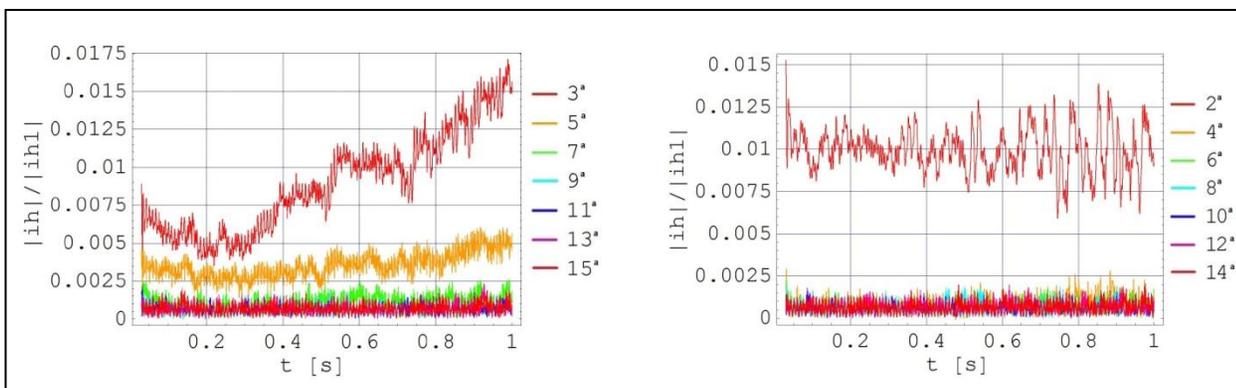


Figura B.9: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 30 A_{ef} .

➤ Ensaio classe 50 A_{ef}

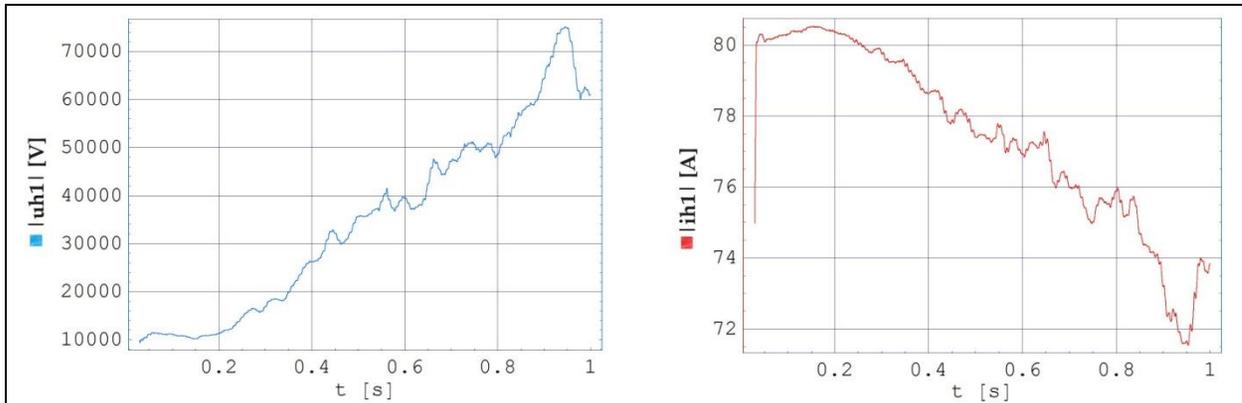


Figura B.10: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 50 A_{ef}.

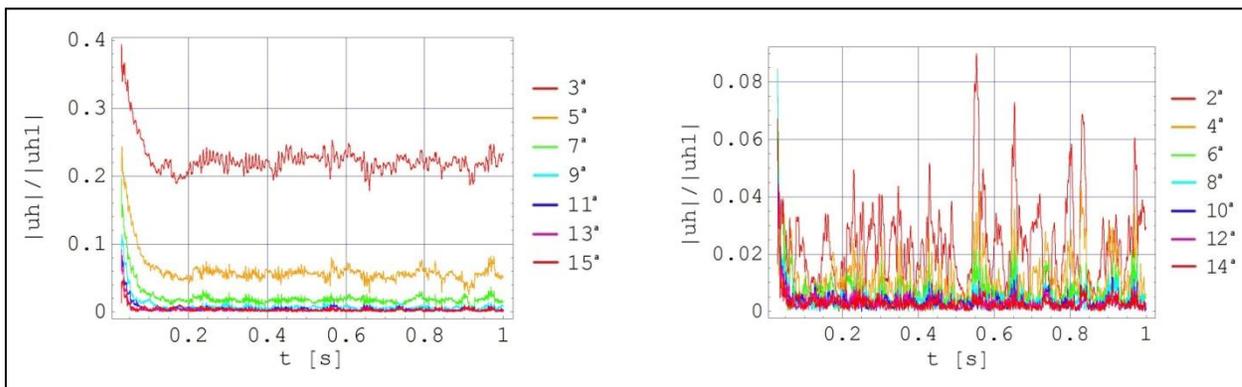


Figura B.11: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 50 A_{ef}.

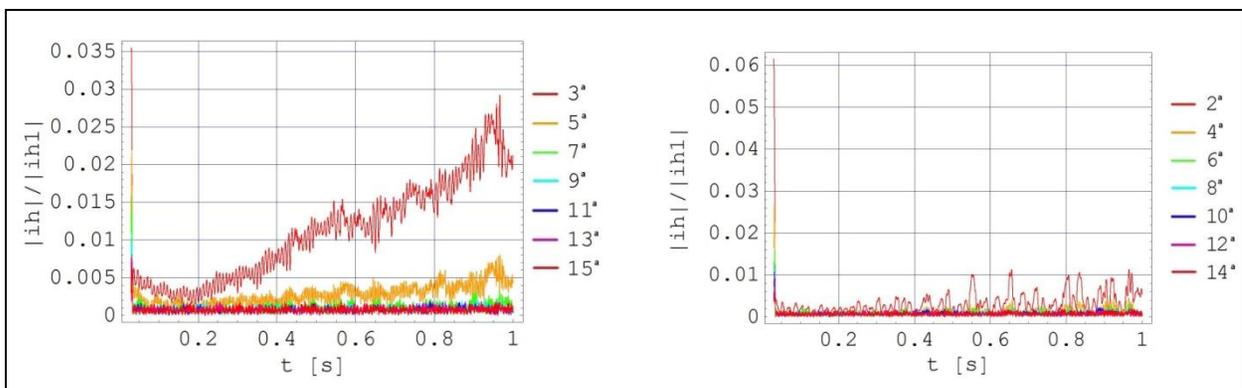


Figura B.12: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 50 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 60 A_{ef}

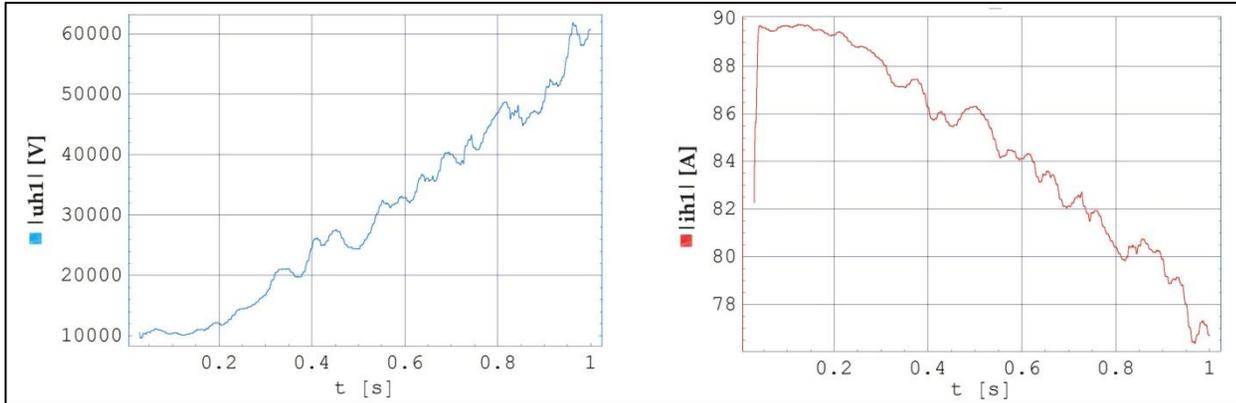


Figura B.13: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 60 A_{ef} .

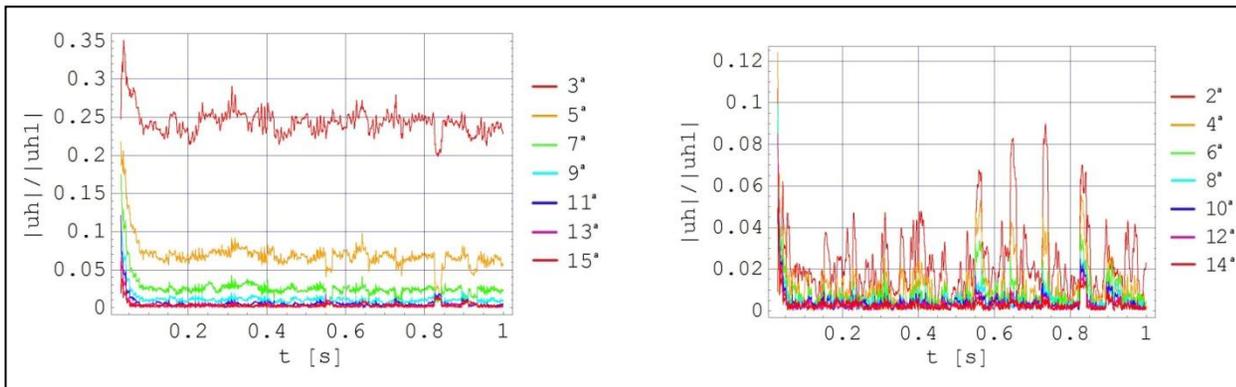


Figura B.14: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 60 A_{ef} .

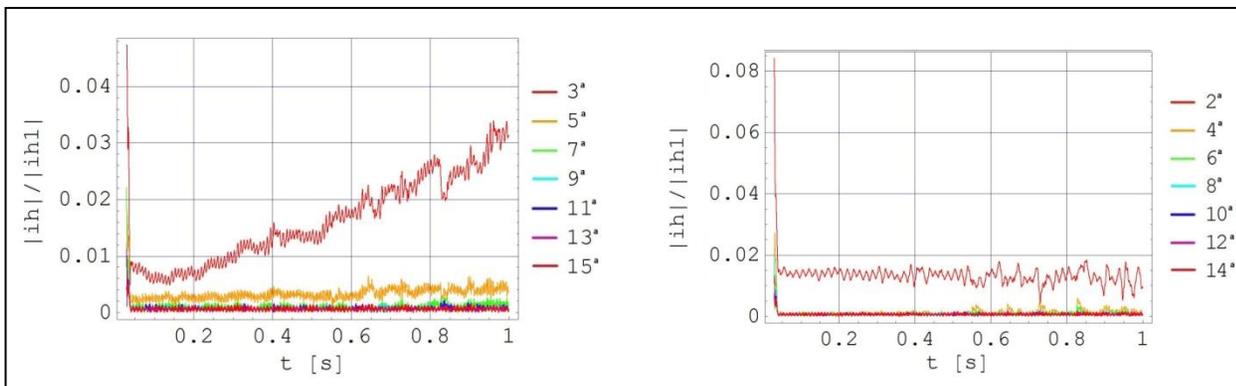


Figura B.15: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 60 A_{ef} .

➤ Ensaio classe 100 A_{ef}

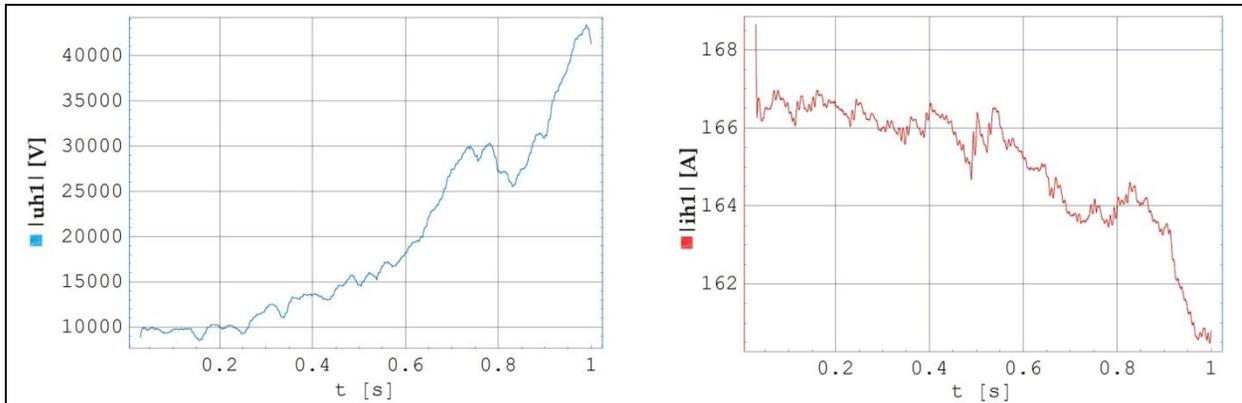


Figura B.16: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 100 A_{ef} .

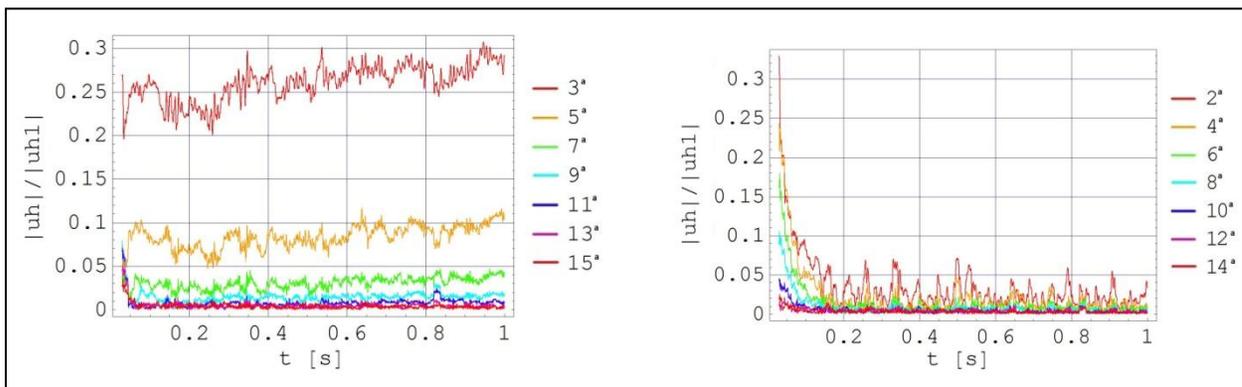


Figura B.17: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 100 A_{ef} .

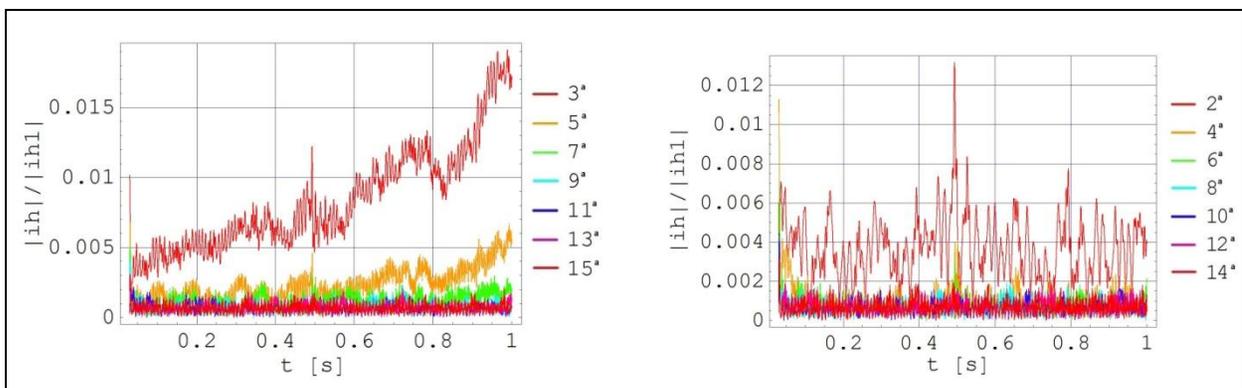


Figura B.18: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 100 A_{ef} .

➤ Ensaio classe 150 A_{ef}

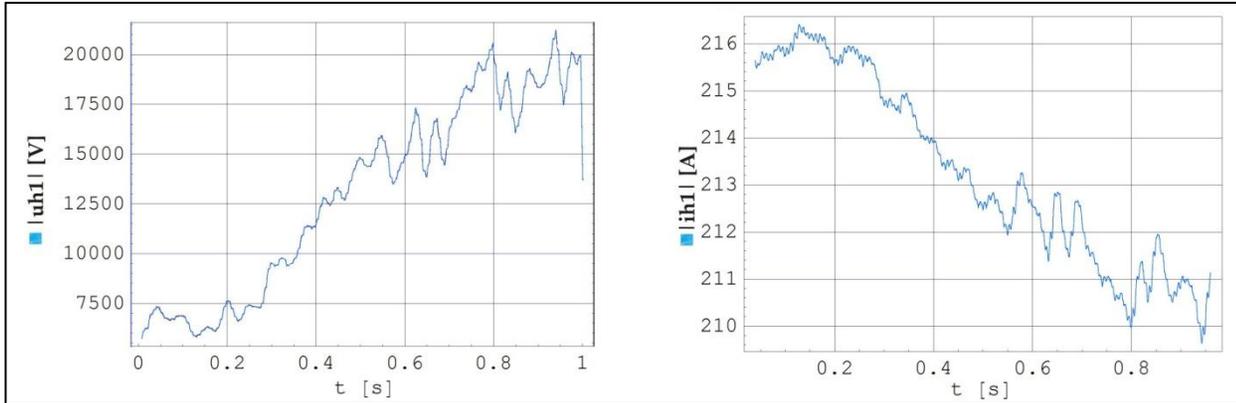


Figura B.19: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e corrente de um arco classe 150 A_{ef}.

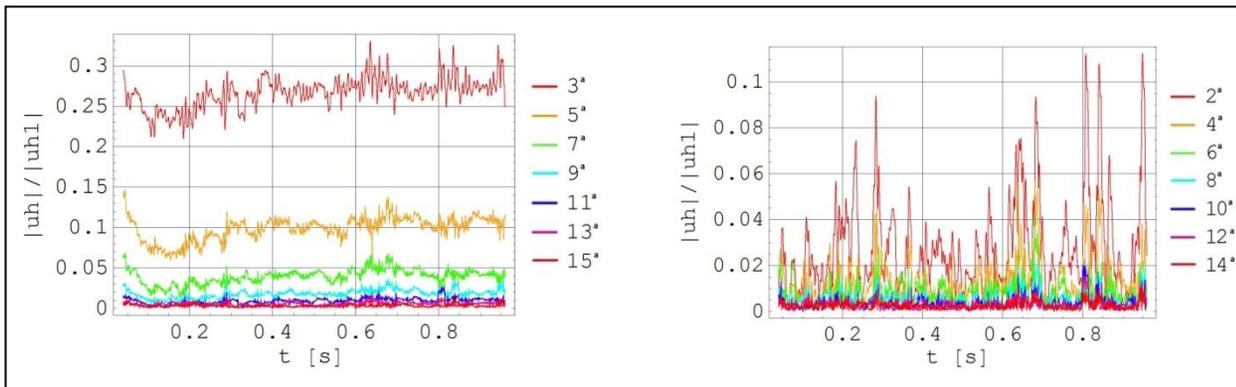


Figura B.20: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 150 A_{ef}.

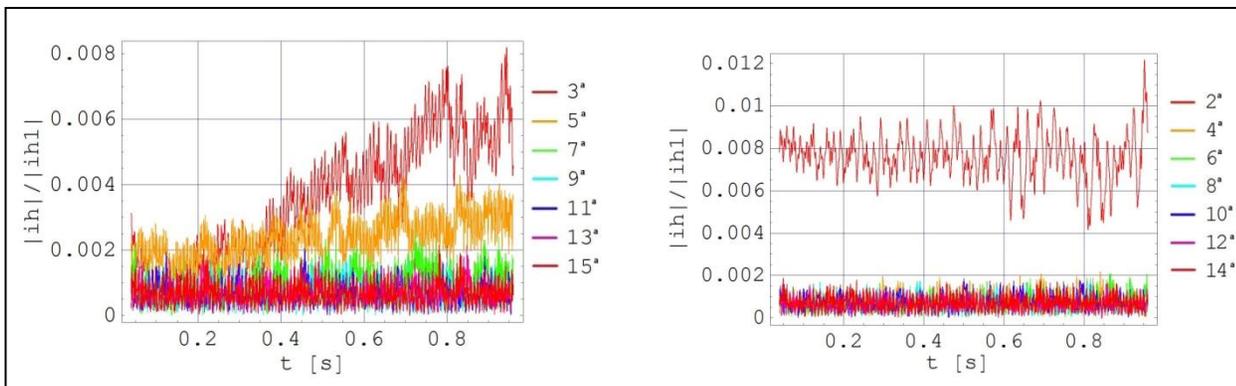


Figura B.21: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 150 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 300 A_{ef}

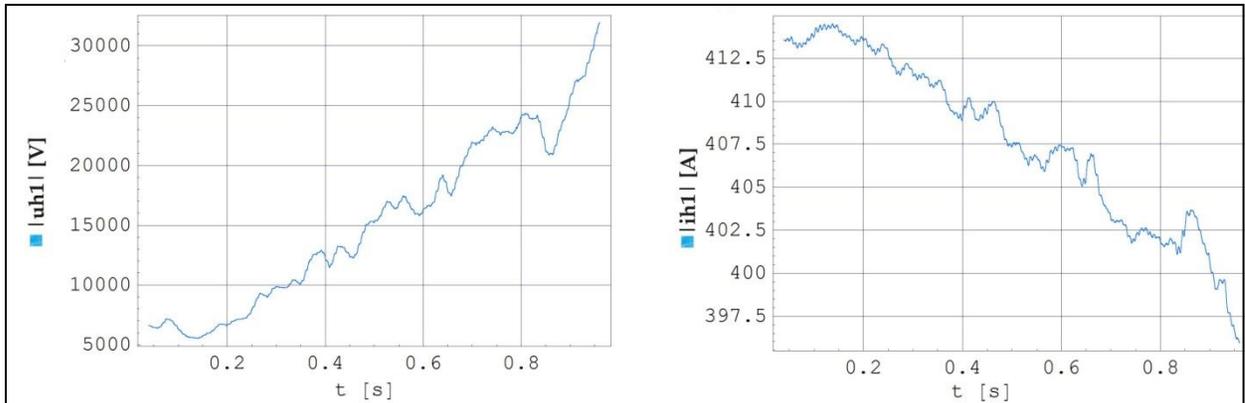


Figura B.22: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 300 A_{ef} .

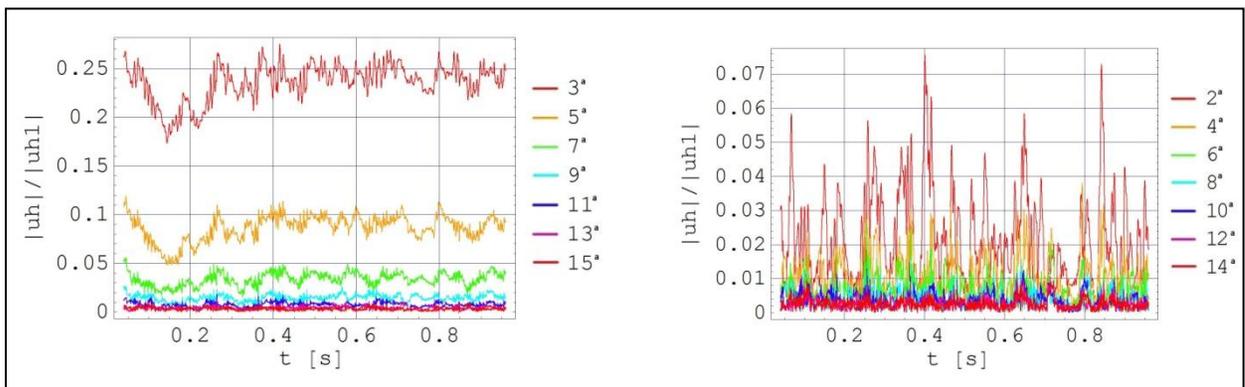


Figura B.23: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 300 A_{ef} .

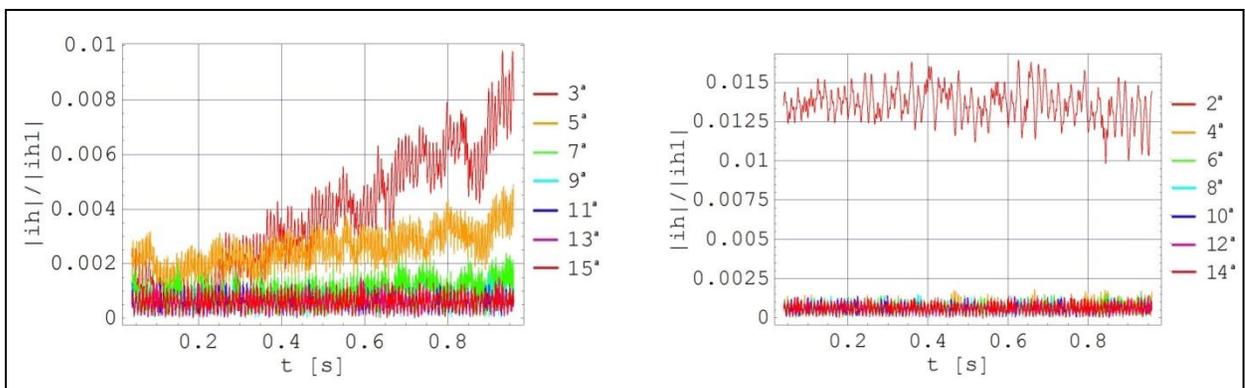


Figura B.24: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 300 A_{ef} .

➤ Ensaio classe 500 A_{ef}

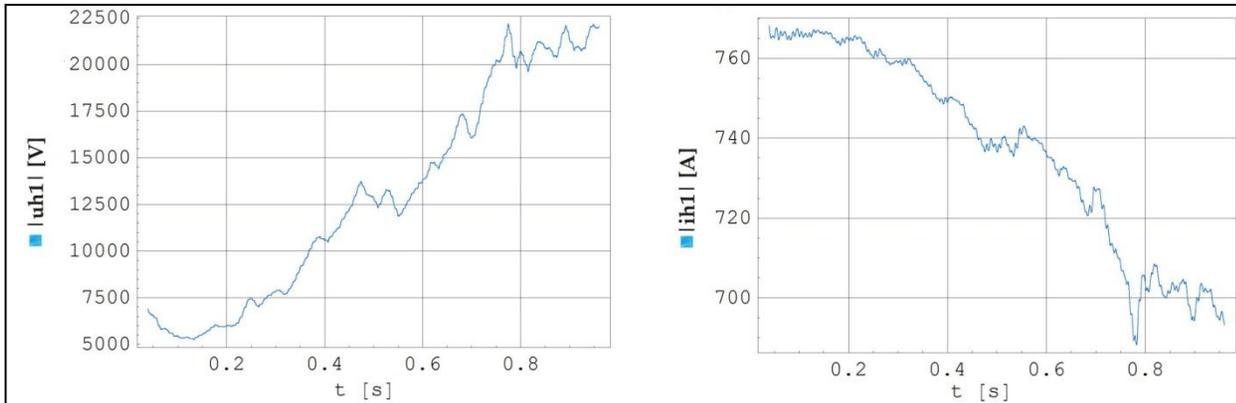


Figura B.25: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 500 A_{ef} .

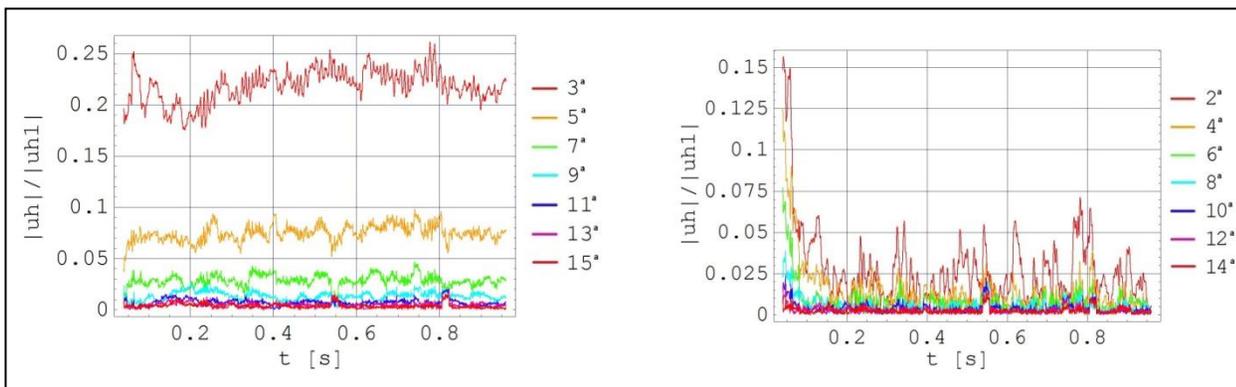


Figura B.26: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 500 A_{ef} .

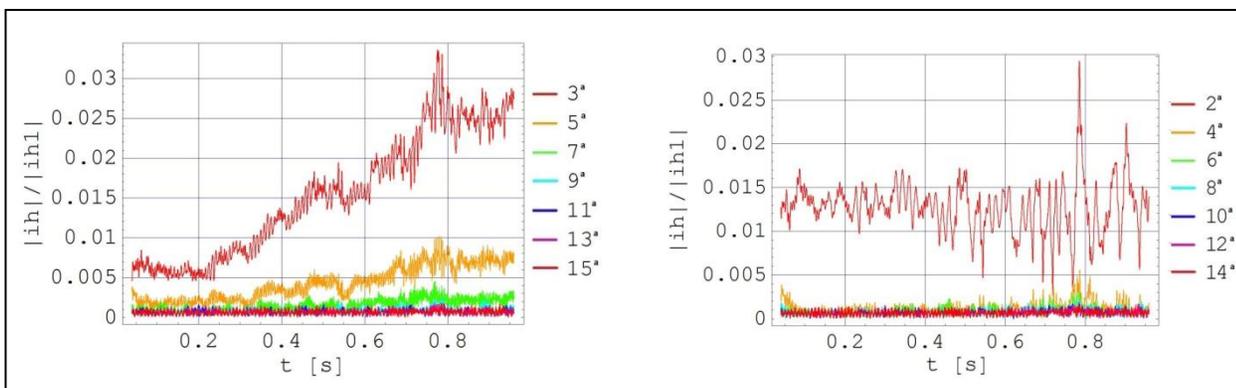


Figura B.27: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 500 A_{ef} .

➤ **Ensaio classe 1000 A_{ef}**

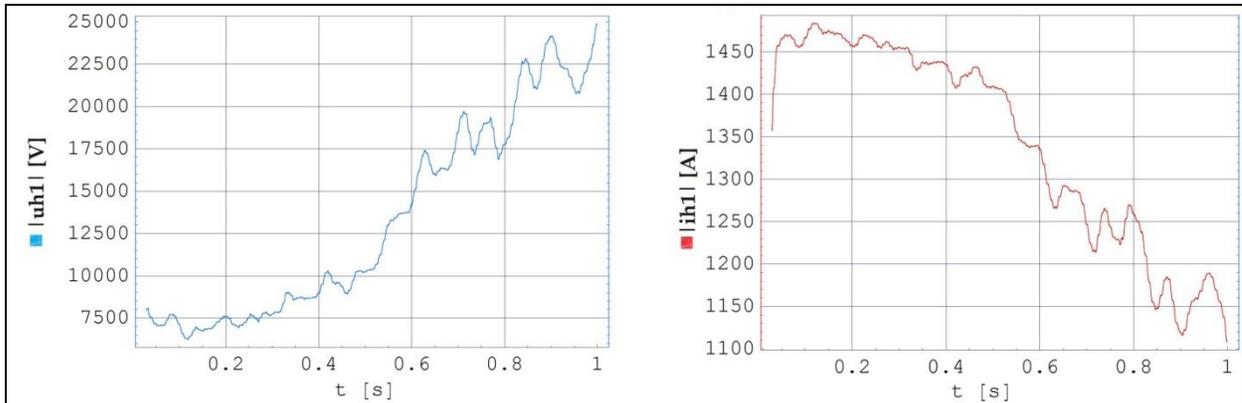


Figura B.28: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 1000 A_{ef}.

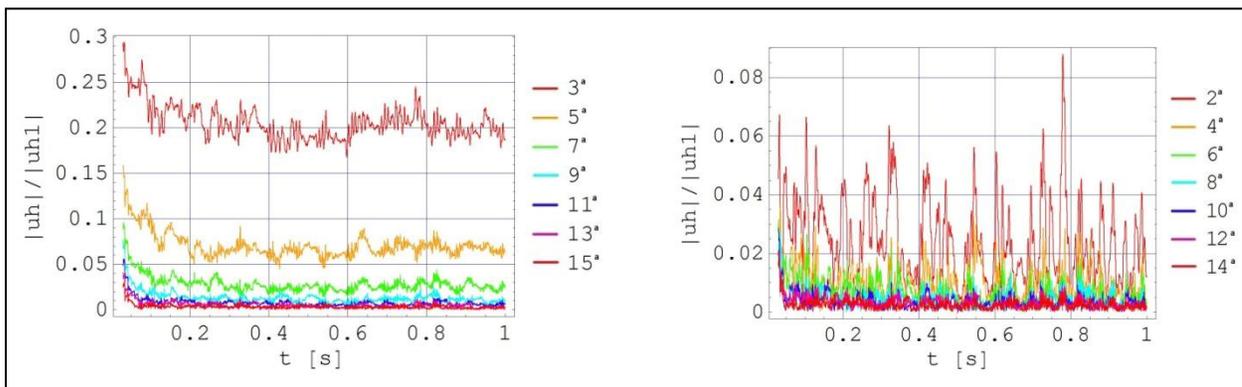


Figura B.29: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 1000 A_{ef}.

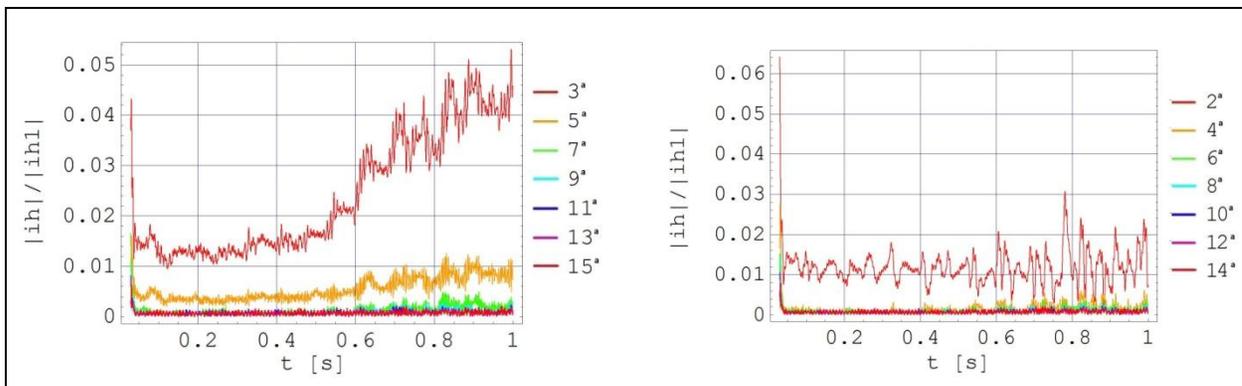


Figura B.30: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 1000 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 3000 A_{ef}

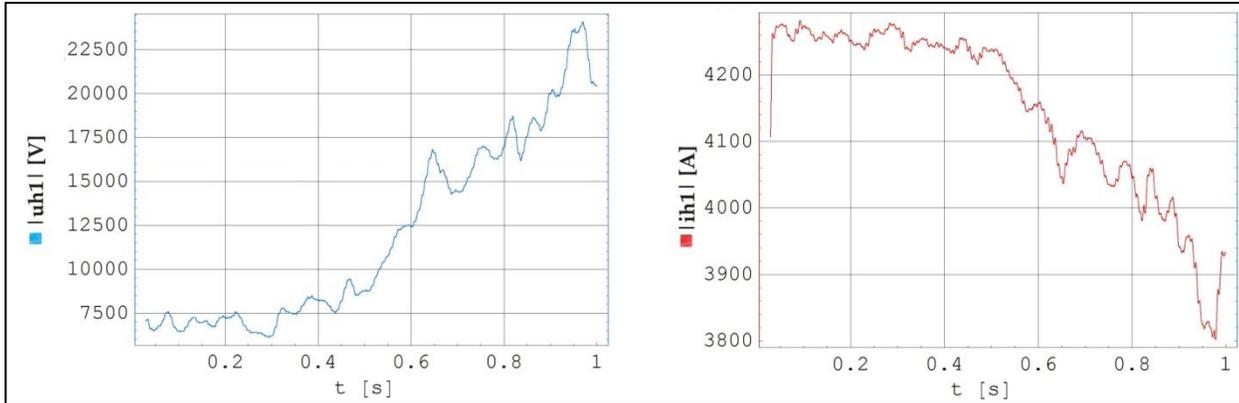


Figura B.31: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 3000 A_{ef}.

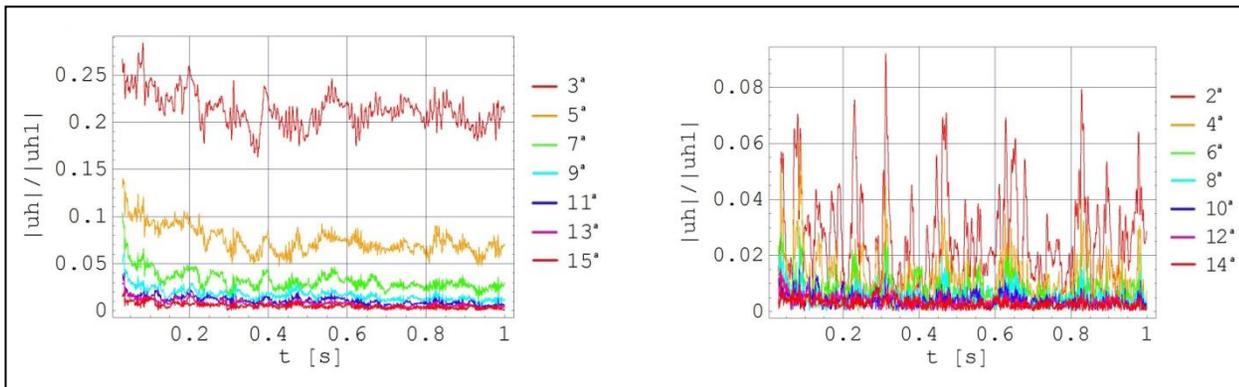


Figura B.32: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 3000 A_{ef}.

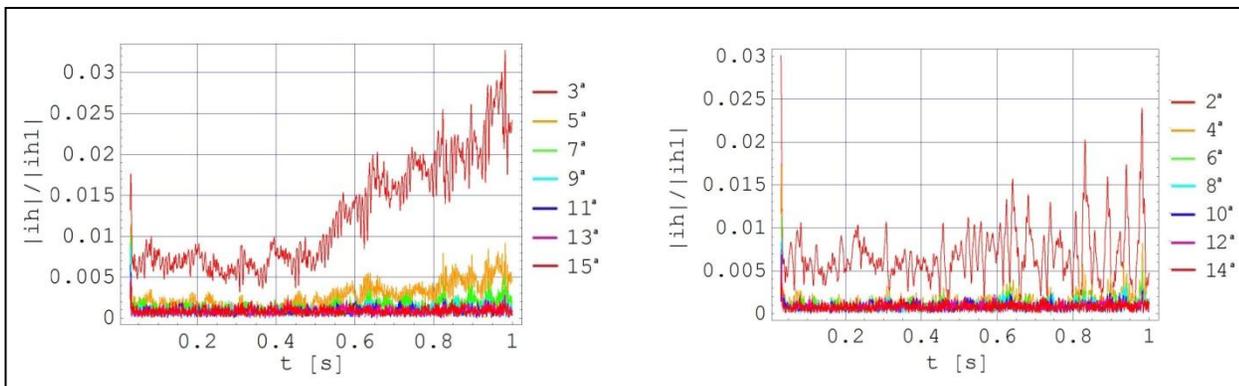


Figura B.33: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 3000 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 5000 A_{ef}

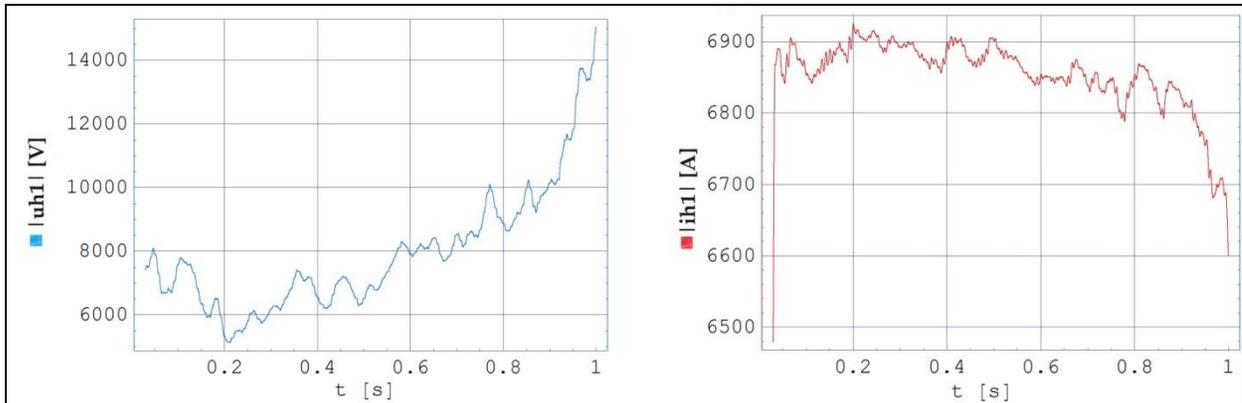


Figura B.34: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de um arco classe 5000 A_{ef}.

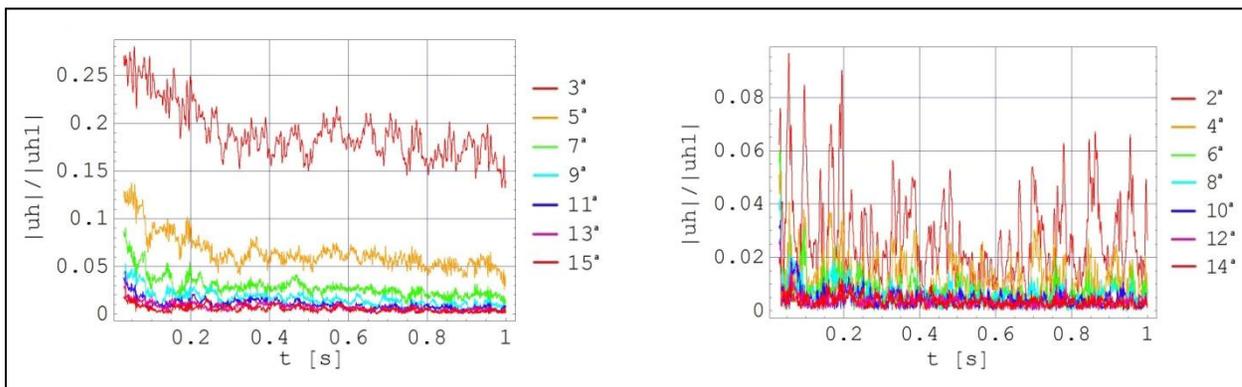


Figura B.35: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 5000 A_{ef}.

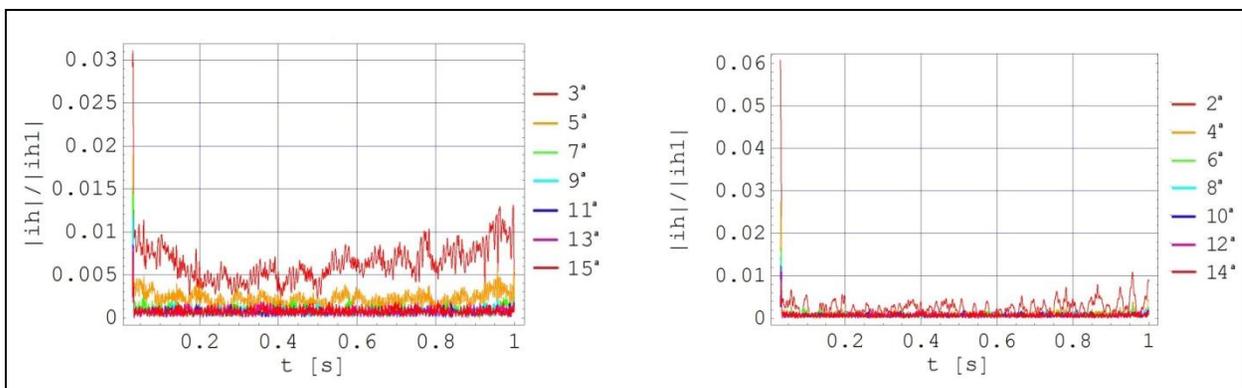


Figura B.36: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 5000 A_{ef}.

➤ Ensaio classe 10.000 A_{ef}

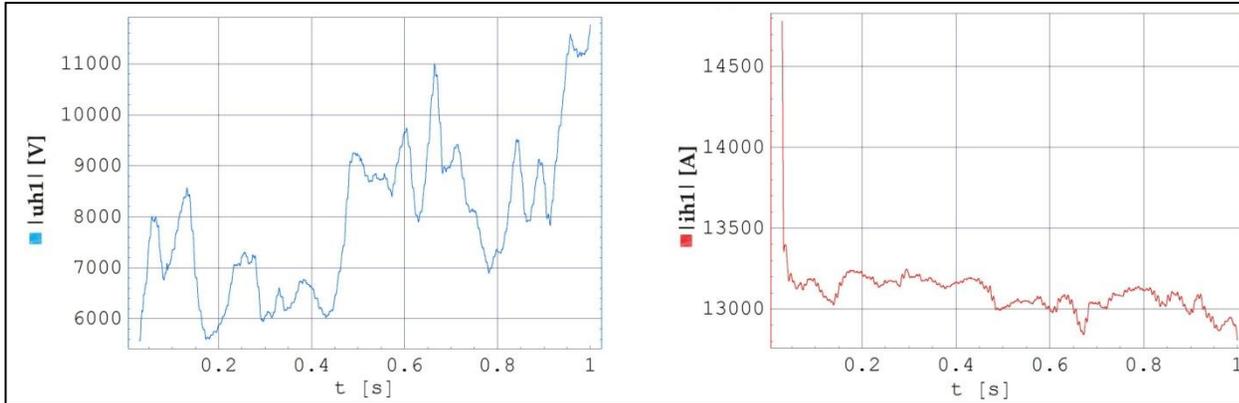


Figura B.37: Pseudo-harmônicas de 1ª ordem de tensão e de corrente de arco classe 10.000 A_{ef}.

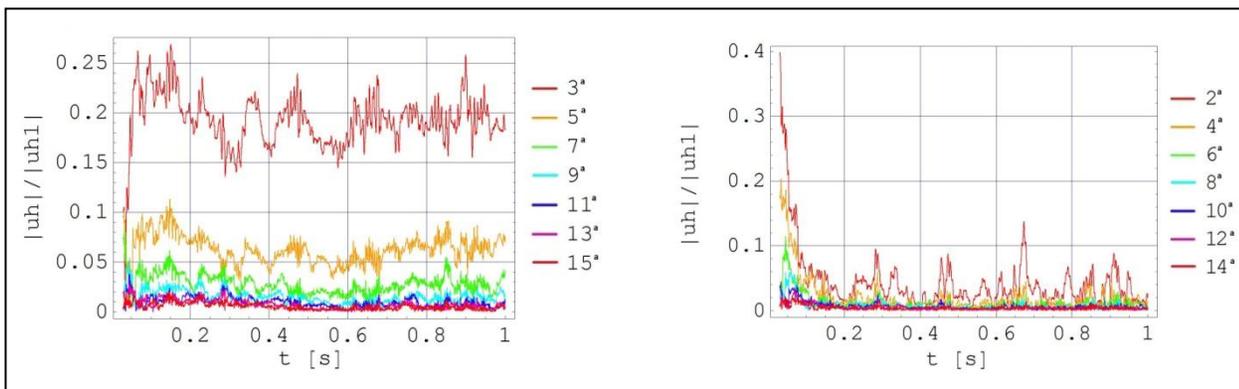


Figura B.38: Relação entre as pseudo-harmônicas de tensão de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 10.000 A_{ef}.

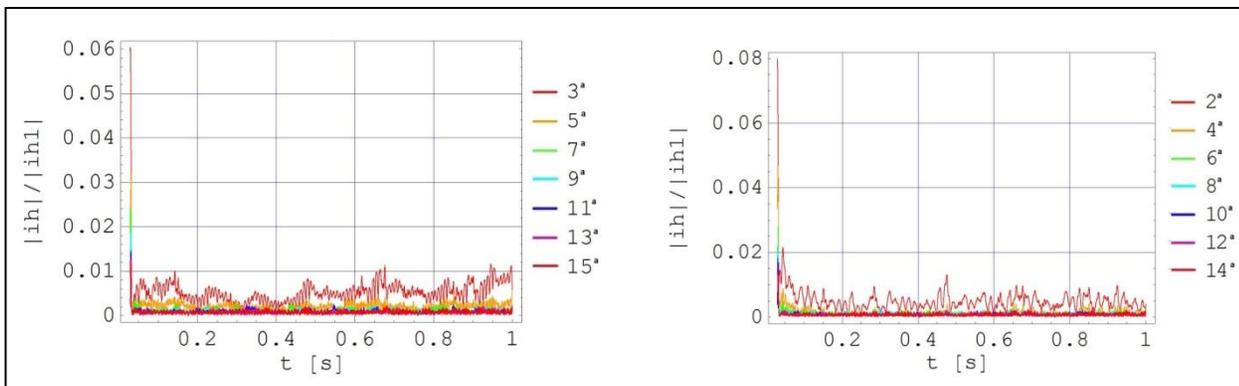


Figura B.39: Relação entre as pseudo-harmônicas de corrente de ordem ímpar e par e a pseudo-harmônica de 1ª ordem de um arco classe 10.000 A_{ef}.

APÊNDICE C

ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DE COMPRIMENTO DE ARCOS ELÉTRICOS

Neste apêndice são apresentadas as curvas da estimativa da variação de comprimento resultantes dos arcos elétricos analisados conforme a metodologia descrita nas seções 6.1 e 6.2. As curvas são referentes aos ensaios com classes de corrente de 15 A_{ef} , 20 A_{ef} , 30 A_{ef} , 100 A_{ef} , 150 A_{ef} , 200 A_{ef} , 500 A_{ef} , 1.000 A_{ef} e 5.000 A_{ef} . As curvas dos arcos elétricos classe 60 A_{ef} e 300 A_{ef} podem ser vistas na seção 6.3.

Os resultados são apresentados a seguir:

➤ **Ensaio classe 15 A_{ef}**

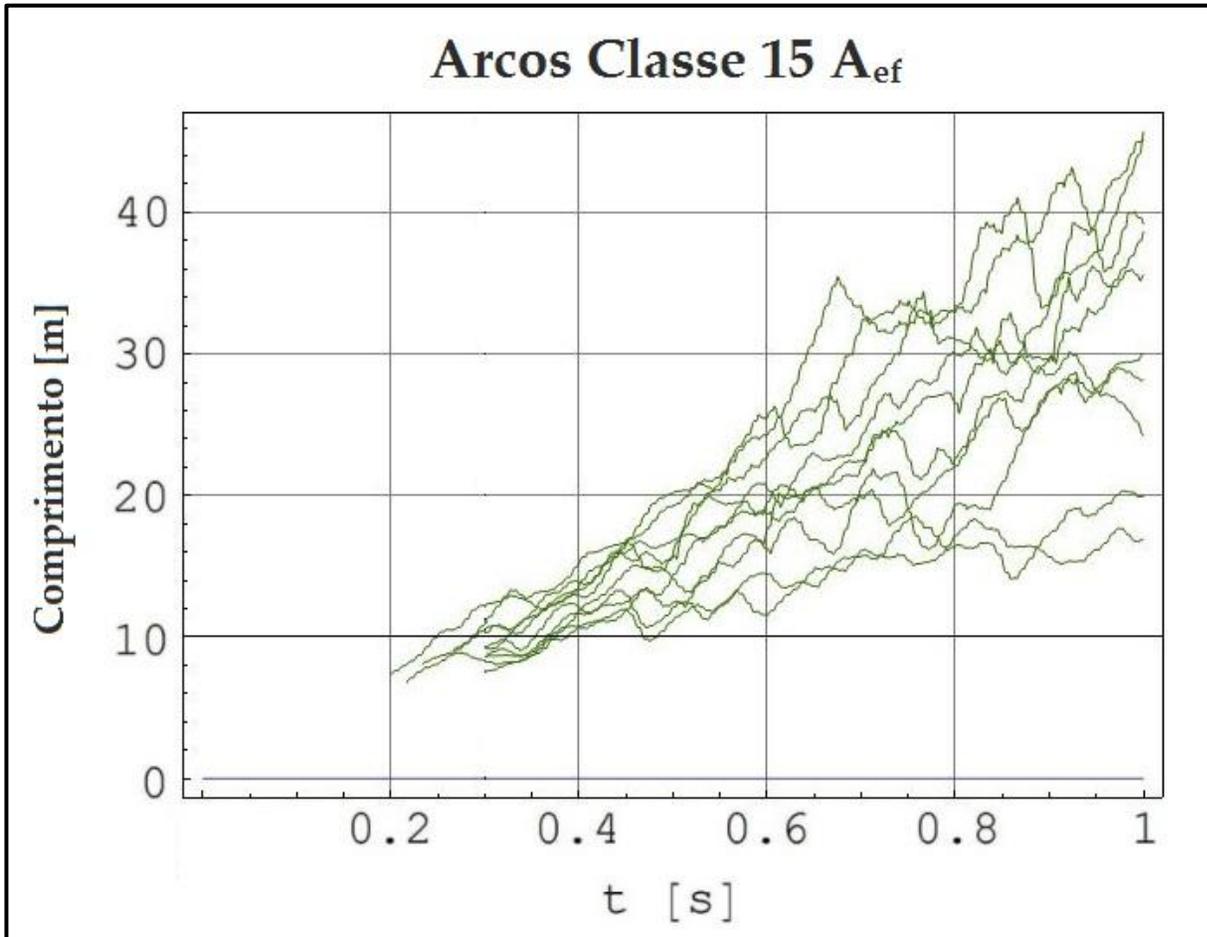


Figura C.1: Estimativa de comprimento para arcos classe 15 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 20 A_{ef}**

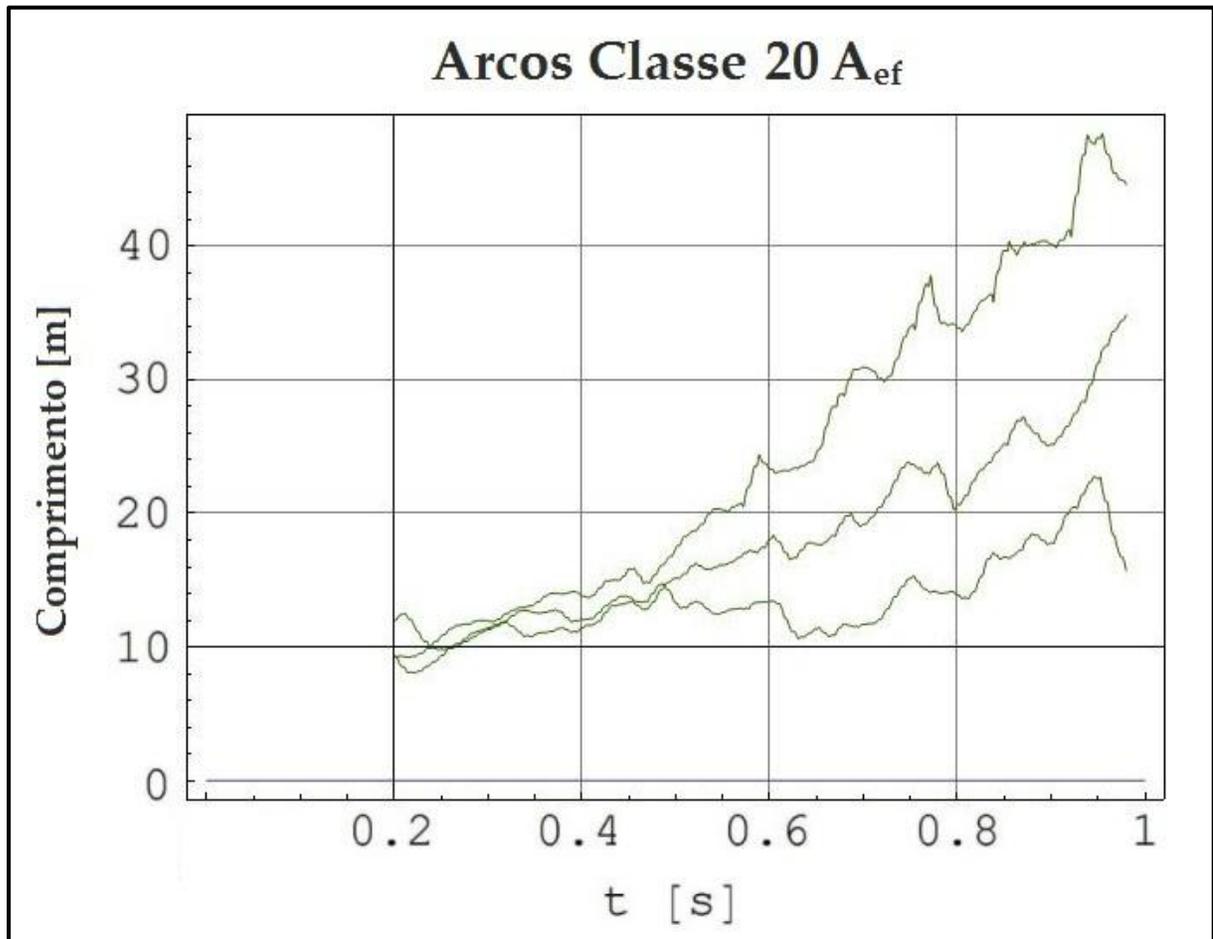


Figura C. 2: Estimativa de comprimento para arcos classe 20 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 30 A_{ef}**

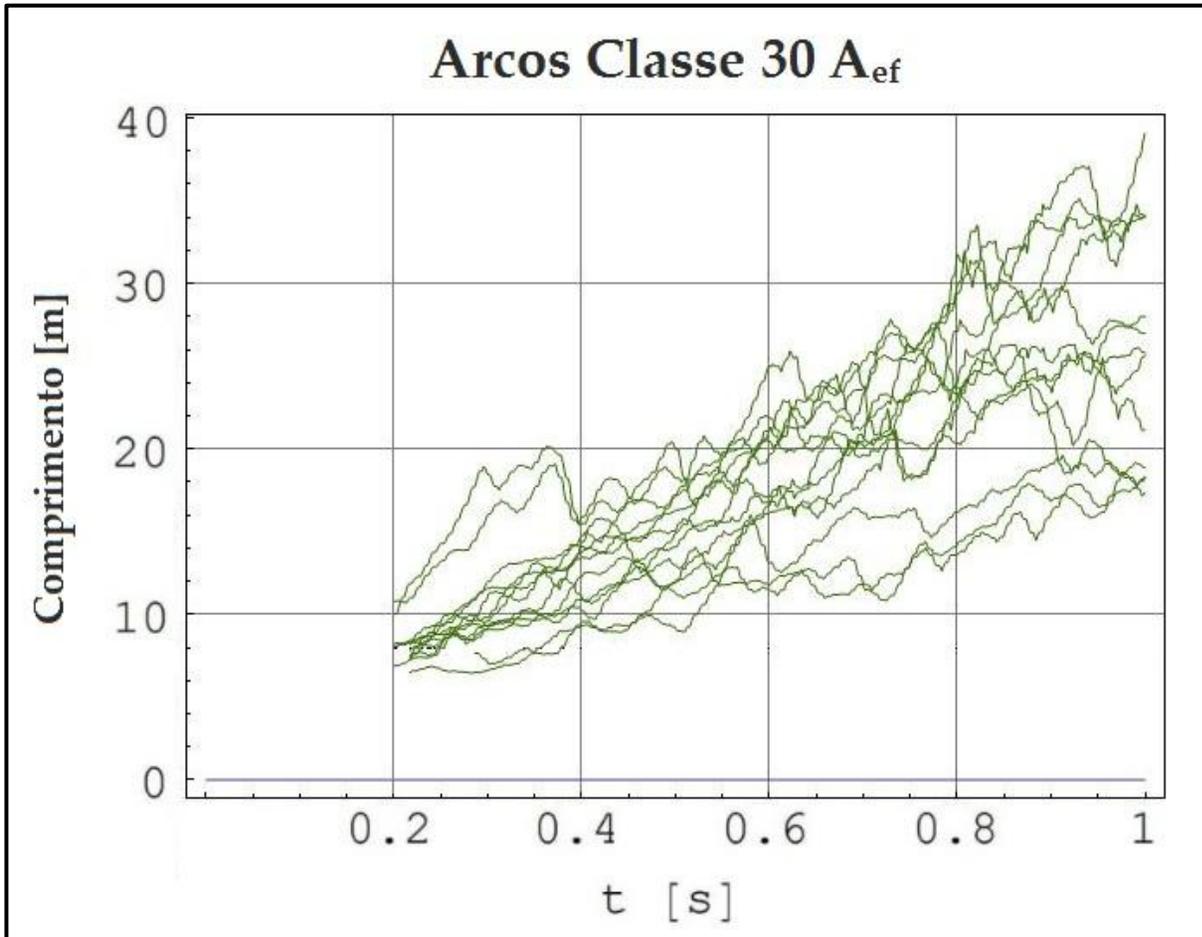


Figura C. 3: Estimativa de comprimento para arcos classe 30 A_{ef} .

➤ **Ensaio classe 100 A_{ef}**

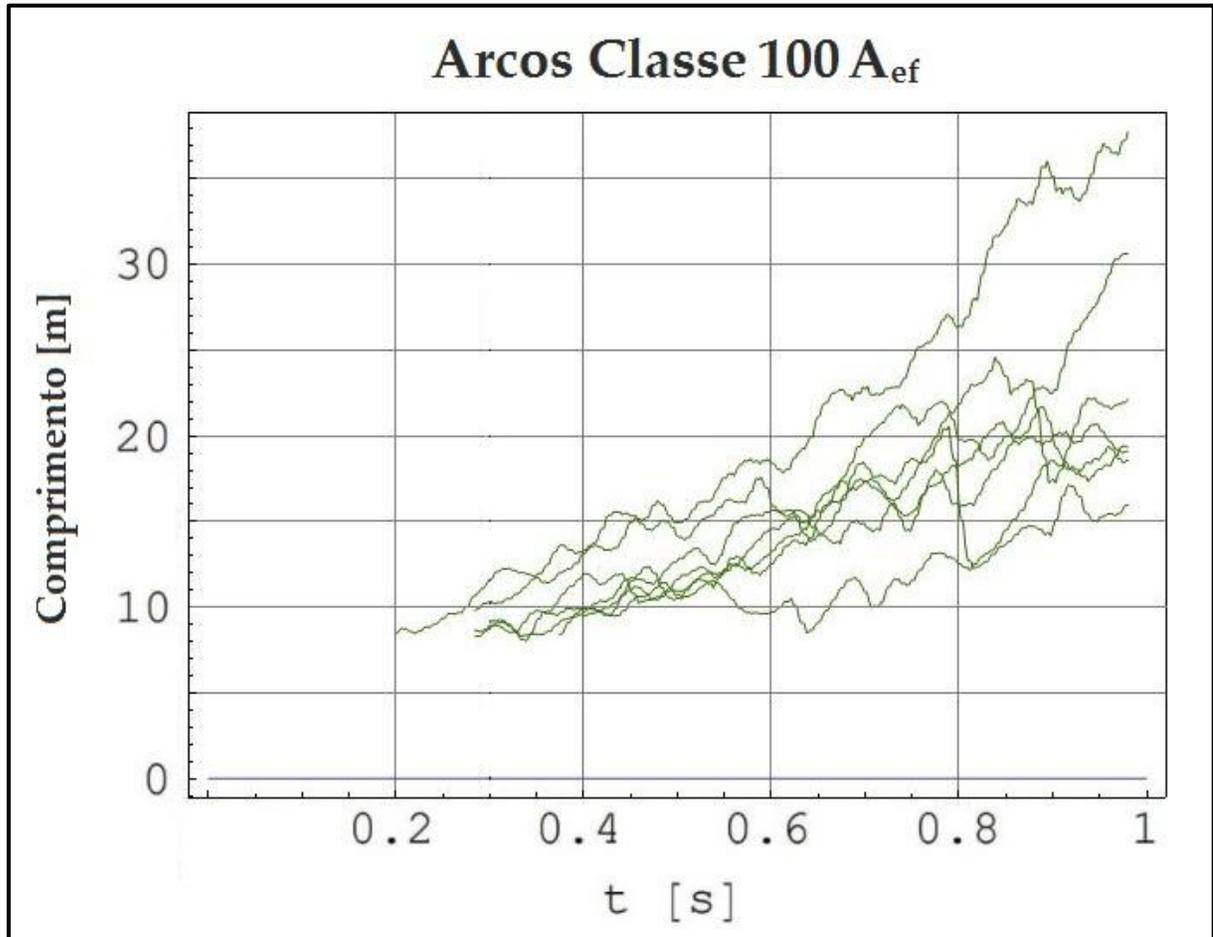


Figura C. 4: Estimativa de comprimento para arcos classe 100 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 150 A_{ef}**

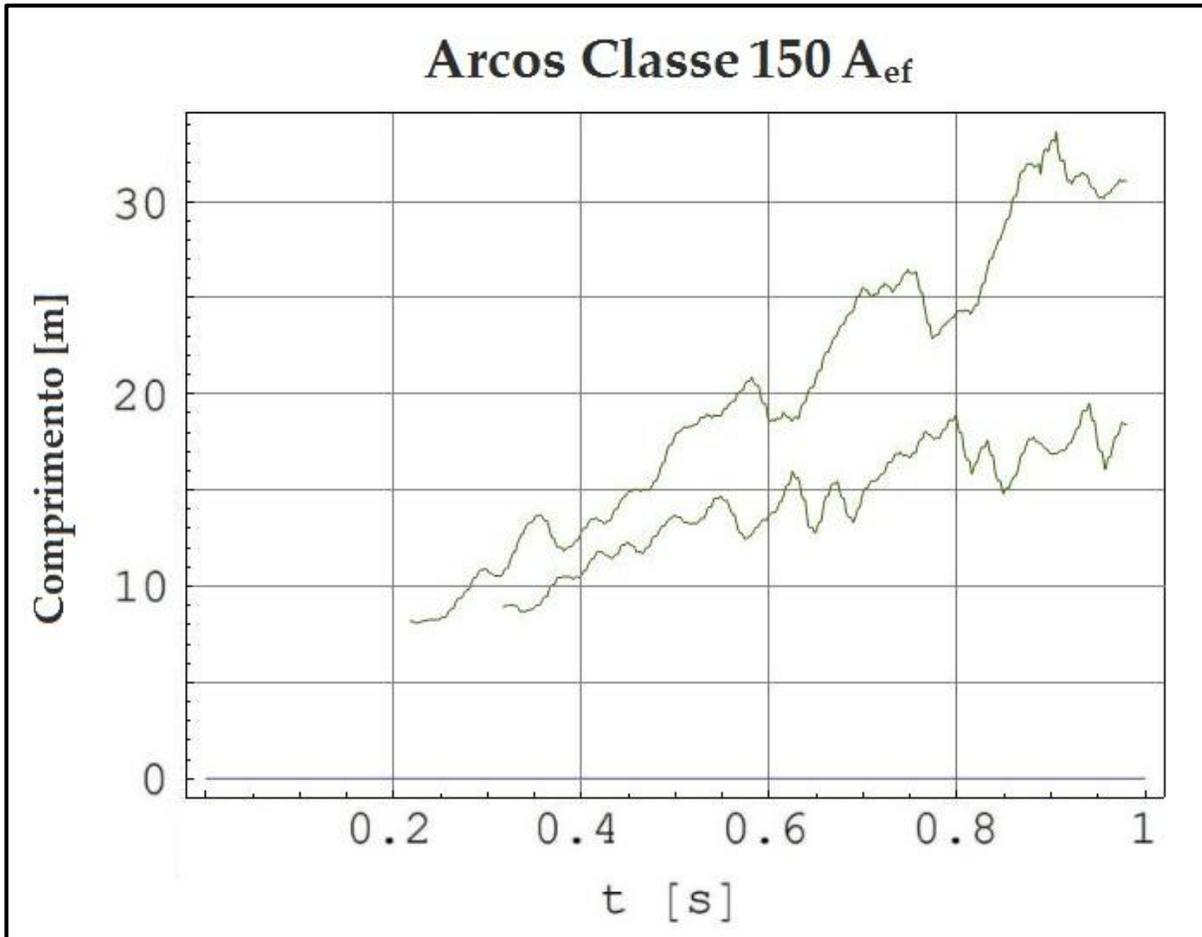


Figura C. 5: Estimativa de comprimento para arcos classe 150 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 200 A_{ef}**

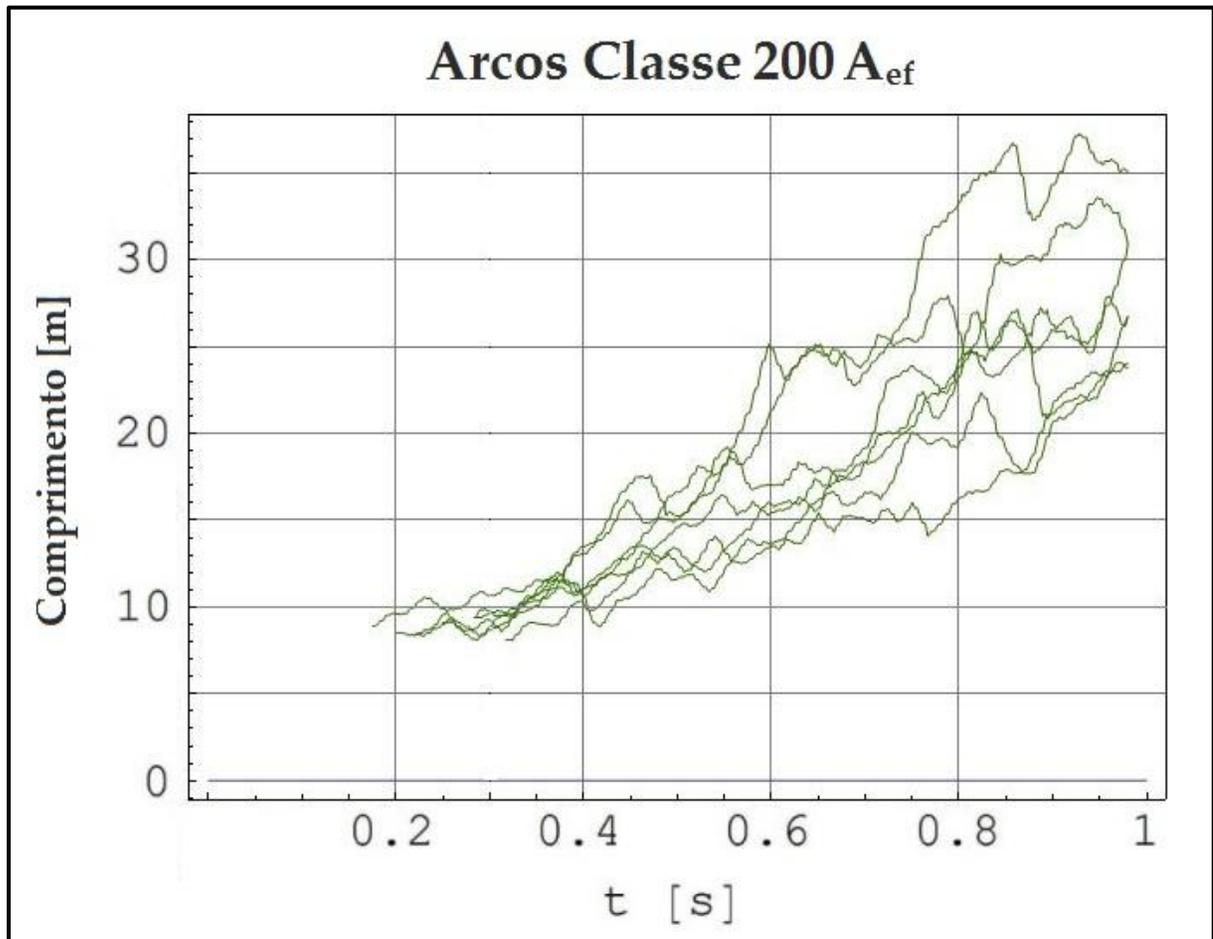


Figura C. 6: Estimativa de comprimento para arcos classe 200 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 500 A_{ef}**

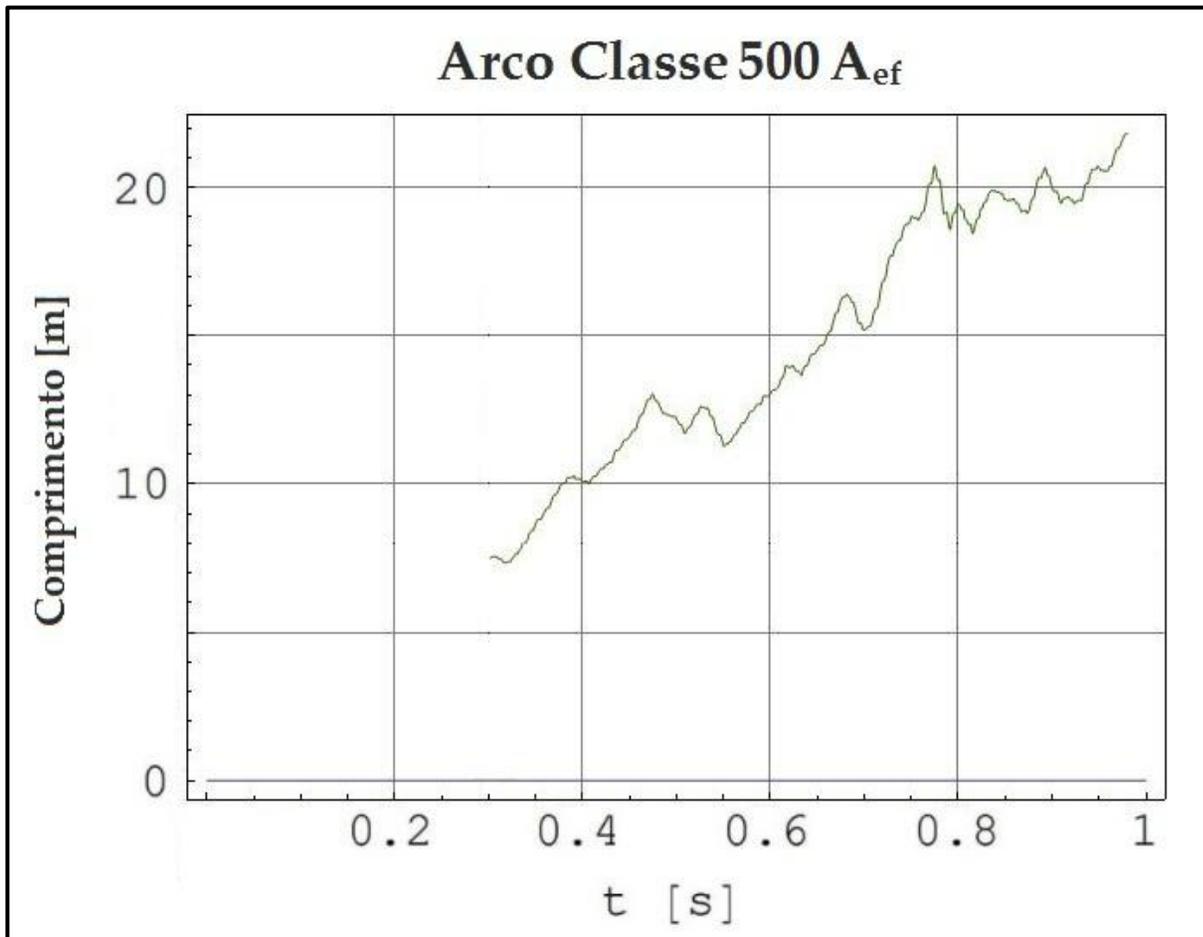


Figura C. 7: Estimativa de comprimento para arco classe 500 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 1000 A_{ef}**

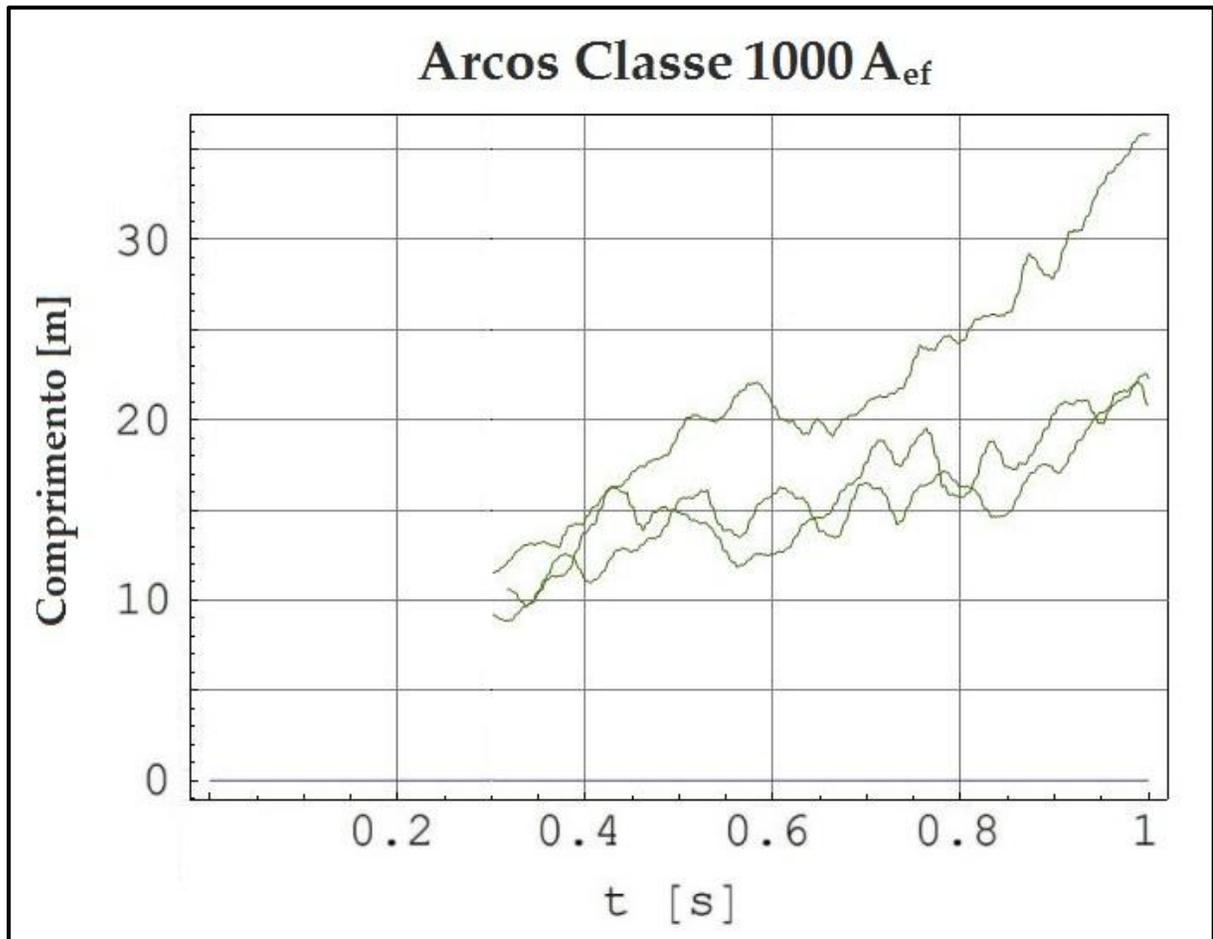


Figura C. 8: Estimativa de comprimento para arcos classe 1000 A_{ef}.

➤ **Ensaio classe 5000 A_{ef}**

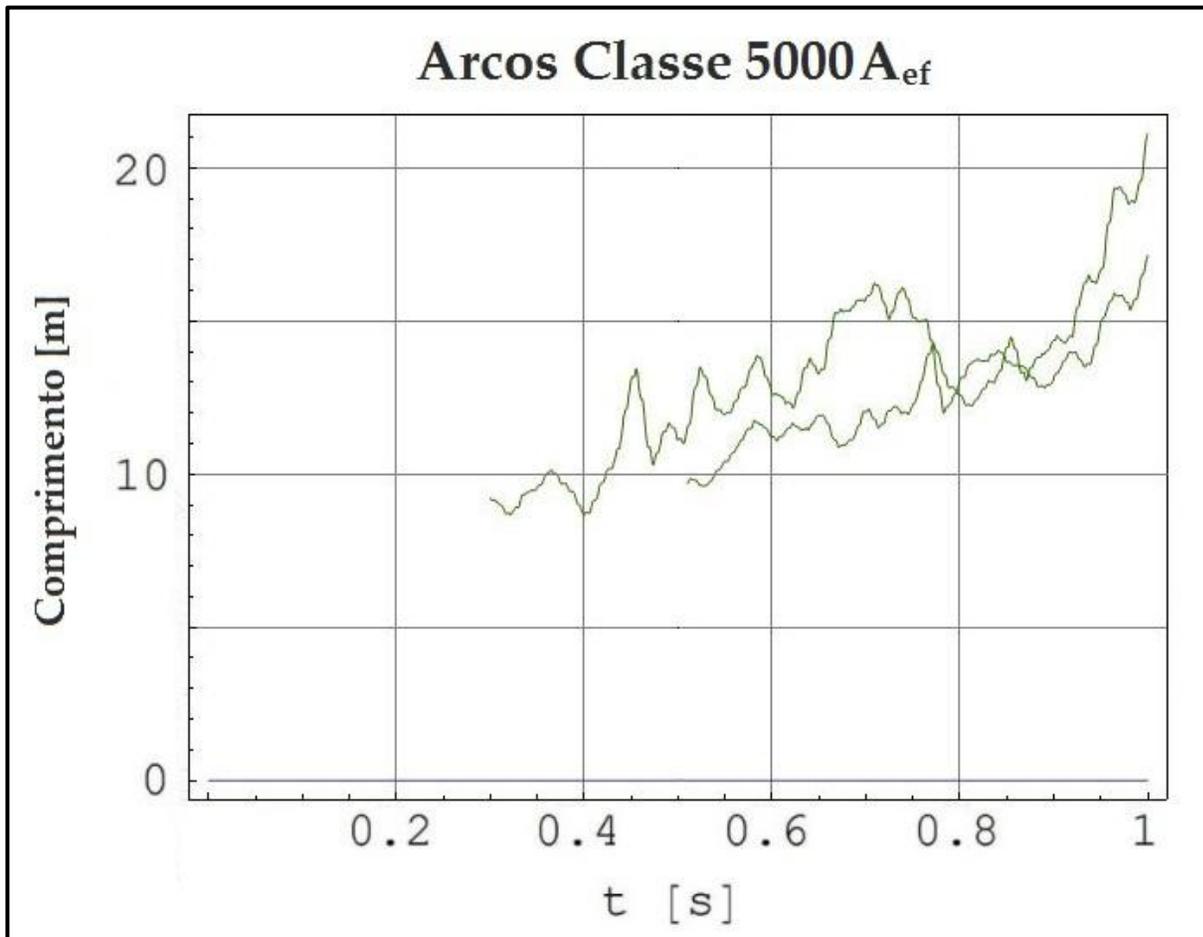


Figura C. 9: Estimativa de comprimento para arcos classe 5000 A_{ef}.