



COPPE/UFRJ

IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS DE
ESTIMAÇÃO DE ESTADOS E PARÂMETROS

Otto Wanner Ganvini Asencios

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de
Lima

Rio de Janeiro

Julho de 2009

IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS DE
ESTIMAÇÃO DE ESTADOS E PARÂMETROS

Otto Wanner Ganvini Asencios

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:



Prof. Antonio Carlos Siqueira Lima, D.Sc.



Prof. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela, D.Sc.



Prof. Sandoval Carneiro Jr., Ph.D.



Prof. Afonso Celso del Nero Gomes, D.Sc.



Prof. Frederico Caetano Jandre Assis Tavares, D.Sc.



Prof. Maria Cristina Dias Tavares, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2009

Ganvini Asencios, Otto Wanner

Identificação dos Parâmetros do Arco Elétrico Através de Estimação de Estados e Parâmetros/Otto Wanner Ganvini Asencios. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIV, 115 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 101 – 109.

1. Estimação de parâmetros Arco Elétrico. 2. Filtro de Kalman. 3. Máxima Verossimilhança. 4. Equivalente de rede. I. Lima, Antonio Carlos Siqueira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Aos meus pais, Eladio e Hilda, a
minha esposa Fernanda, meus
filhos Cristina e João.*

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida, e por todas as coisas boas que aconteceram na minha vida.

A minha família, meus pais Eladio e Hilda, a minha esposa Fernanda, meus filhos Cristina e João, meus irmãos e sobrinhos pelo seu apoio e carinho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico dos Estados Unidos do Brasil (CNPq) pelo suporte financeiro.

Ao Professor Antonio Carlos Siqueira de Lima pela orientação, dedicação e incentivo e ao Professor Carlos Manuel de Jesus CM Portela pelos comentários e ajuda durante a etapa experimental dessa pesquisa.

Aos companheiros dos laboratórios LASPOT e CORONA, pelo apoio e pela amizade.

A todos os professores do programa de engenharia elétrica e em particular aos professores Alquindar Pedroso, Sandoval Carneiro Junior, Glauco Nery Taranto.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ARCO ELÉTRICO ATRAVÉS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS E PARÂMETROS

Otto Wanner Ganvini Asencios

Julho/2009

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe a implementação de um método de identificação de sistemas não lineares baseado na linearização em um ponto de operação e a posterior estimação estados e parâmetros baseado no Filtro de Kalman e no método de Máxima Verossimilhança. Para melhorar o processo de estimação e identificação é realizado um refinamento utilizando o método de Gauss-Newton.

A metodologia é aplicada à identificação de arcos elétricos em disjuntores e no ar. Resultados experimentais e de simulação são utilizados para testar a metodologia proposta. Os resultados de simulação foram considerados arcos elétricos em disjuntores e no ar. Já os resultados experimentais tratam na modelagem do arco no ar. Diferentes modelos de arco foram considerados e os erros encontrados no processo de identificação foram pequenos independentemente da modelagem do arco considerada.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

IDENTIFICATION OF ELECTRIC ARC PARAMETERS USING STATE AND
PARAMETERS ESTIMATION

Otto Wanner Ganvini Asencios

July/2009

Advisor: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Department: Electrical Engineering

This work proposes a methodology for identification of nonlinear circuits based on linearization and estimation of states and parameters based on Maximum Likelihood and Kalman Filter. To improve the procedure a Gauss-Newton refinement is also used.

The methodology is applied to the identification of electric arc in circuit breakers and in the air. Experimental data and simulation results are used for testing. The simulation cases considering the modeling of the arc in circuit breakers and in the air while the experimental cases deal only with the arc in the air. The identification procedure provided acceptable errors regardless of the model considered for the electric arc.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Motivação e Descrição do Trabalho	2
1.3 Revisão da Literatura Técnica	4
1.3.1 Fundamentos da Teoria de Estimação	5
1.3.2 Modelagem e identificação do Arco Elétrico	8
1.3.3 Modelagem de Arco Secundário	11
1.3.4 Avaliação Arco-Rede	13
1.4 Estrutura do Trabalho	14
2 Identificação de Sistemas	16
2.1 Sistemas Dinâmicos	16
2.2 Representação em Espaço de Estado	16
2.2.1 Exemplo Representação de um Circuito RLC em Espaço de Estado	17
2.2.2 Estimação das variáveis de Estado	18
2.2.3 Estimação de Parâmetros A, B, C, D Matriciais	22
2.3 Técnicas e Implementação da Rotina de Estimação Dual de Estado e Parâmetros	24
2.3.1 Estimação do erro de saída (OEM)	27
2.3.2 Discussão	27

3	Arco Elétrico	29
3.1	Conceitos Básicos de Arco Elétrico	29
3.2	Arco Elétrico nos Disjuntores	30
3.2.1	Detalhes da estrutura do arco	31
3.2.2	TRT em Disjuntores	32
3.2.3	A influência de di/dt na capacidade de interrupção do arco	33
3.3	Arco secundário	33
3.3.1	Extinção do arco secundário	33
3.4	Representação dos Modelos de Arco Elétrico em Espaço de Estado	37
3.4.1	Modelo de Arco de Cassie	37
3.4.2	Modelo de Arco de Mayr	38
3.4.3	Modelo de Arco de Habedank	38
3.4.4	Modelo de Arco de Schavemaker	39
3.4.5	Modelo de Arco de Schwarz	40
3.4.6	Modelo Modificado de Thiel	40
3.4.7	Variante do Modelo Modificado de Thiel	41
3.4.8	Modelo de arco de KEMA	42
3.4.9	Modelo de Mayr-Portela	42
3.5	Métodos existentes de identificação dos Parâmetros do Arco	44
3.5.1	Método de Amsink a partir de um ensaio	44
3.5.2	Método de Rijanto-Circuito especial de injeção de corrente	44
3.5.3	Método de Ruppe-A partir de vários ensaios de abertura	44
3.5.4	Método Asturiano ou Próprio	44
3.5.5	Considerações adicionais sobre a determinação dos Parâmetros do Arco	45
3.5.6	A modelagem do Arco para pequenas correntes	45
3.5.7	Discussão	45
4	Identificação do Arco Elétrico	47
4.1	Identificação do Arco Elétrico para Casos Simulados	47
4.1.1	Arco Elétrico no Disjuntor	48
4.1.2	Arco Secundário	55
4.2	Identificação do Arco Elétrico para Casos Experimentais	60

4.2.1	Montagem Experimental	60
4.2.2	Fonte de Alimentação	61
4.2.3	Espinterômetro	62
4.2.4	Circuitos e Equipamentos de Medição	66
4.2.5	Instrumentos de Medição	66
4.2.6	Arco Elétrico no Ar	67
4.3	Estimação dos Parâmetros do Arco Elétrico Experimental	78
4.3.1	Para o Modelo de Mayr	81
4.3.2	Cálculo dos parâmetros para o Modelo de Schwarz	89
4.3.3	Discussão	97
5	Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros	98
5.1	Trabalhos Futuros	99
	Referências Bibliográficas	101
A	Modelos de Sistemas Dinâmicos	110
A.1	Revisão da teoria de sistemas lineares	110
A.1.1	Método de Discretização	111
A.2	Sistemas Não Lineares	111
A.3	Estimação de Sistemas Não Lineares	111
B	Máxima Verossimilhança	113
B.1	Rotina de Otimização	114
B.2	Métodos de Discretização	114
B.2.1	Método de Zero-Order Hold	114

Lista de Figuras

2.1	Circuito RLC	18
2.2	Sistema Expresso em Variáveis de Estado com Ruídos na Entrada e na Saída	21
2.3	Sistema com o Filtro de Kalman	21
2.4	Diagrama geral da rotina de Estimação dual	26
2.5	Estimação de Erro de Saída	27
3.1	Representação do Arco secundário	34
3.2	Foto de um Arco Secundário Real	35
3.3	Arco Secundário iniciado por uma ponte no espaço aéreo	35
3.4	Arco Secundário iniciado curto circuitando o isolador de Linha	36
4.1	Circuito implementado para representar o Arco num disjuntor	48
4.2	Tensão do Arco para o modelo de Mayr	49
4.3	Corrente do Arco para o modelo de Mayr	50
4.4	condutância do Arco para o modelo de Mayr	50
4.5	Tensão do Arco para o modelo de Schwarz	52
4.6	Corrente do Arco para o modelo de Schwarz	53
4.7	condutância do Arco para o modelo de Schwarz	53
4.8	Resultados da Simulação da Corrente de Arco para o modelo de Mayr	54
4.9	Circuito Implementado para Representar o Arco Secundário	55
4.10	Tensão do Arco Mayr-Portela	55
4.11	Corrente Total do Arco Mayr-Portela	56
4.12	Corrente dos Sub-arcos do Arco Mayr-Portela	56
4.13	Condutância dos Sub-arcos do Arco Mayr-Portela	57

4.14	Resultados da simulação da corrente de Arco para o modelo de Mayr-Portela	58
4.15	Circuito implementado para representar o arco no ar	61
4.16	Autotransformador 0,11/80 kV	62
4.17	Espinterômetro	63
4.18	Detalhes dos eletrodos	63
4.19	Detalhes do eletrodo	64
4.20	Detalhes do eletrodo	64
4.21	Detalhes do eletrodo	65
4.22	Divisor Resistivo para Medição da Corrente de Arco	66
4.23	Divisor Capacitivo para Medição da Tensão de Arco	67
4.24	Diagrama Unifilar do circuito montado no laboratório	68
4.25	Tensão e Corrente da fonte que alimenta o Arco	68
4.26	Tensão na fonte que alimenta o Arco	69
4.27	Detalhe da tensão-Início do arco	69
4.28	Detalhe da tensão	70
4.29	Detalhe da tensão-extinção do arco	70
4.30	Detalhe da Corrente do Arco	71
4.31	Detalhe da Corrente-Início do Arco	72
4.32	Detalhe da Corrente	72
4.33	Detalhe da Corrente-extinção do Arco	73
4.34	Tensão do Arco	73
4.35	Detalhe da tensão-Início do Arco	74
4.36	Detalhe da tensão	74
4.37	Detalhe da tensão-extinção do arco	75
4.38	característica tensão-corrente	75
4.39	condutância do arco	76
4.40	Circuito implementado para representar o arco no ar	76
4.41	Circuito implementado para representar o arco no ar	77
4.42	Tensão do arco dentro do Disjuntor	79
4.43	Corrente do arco dentro do Disjuntor	79
4.44	Condutância do arco dentro do Disjuntor	80

4.45	Tensão do arco no Disjuntor-Mayr	81
4.46	Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor-Mayr	82
4.47	Condutância do arco no Disjuntor-Mayr	82
4.48	Tensão do arco no Disjuntor-Schwarz	83
4.49	Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor-Schwarz	83
4.50	Condutância do arco no Disjuntor-Schwarz	84
4.51	Tensão do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado	85
4.52	Quadrado da Corrente do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado	86
4.53	Constância do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado	86
4.54	Tensão do arco no Disjuntor-Mayr-Portela	87
4.55	Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor-Mayr-Portela	87
4.56	Quadrado da Condutância do arco no Disjuntor-Mayr-Portela	88
4.57	Tensão do arco no ar	89
4.58	Corrente do arco no ar	90
4.59	Condutância do arco no ar	90
4.60	característica tensão-corrente	91
4.61	Tensão do arco no ar-Schwarz	91
4.62	Quadrado da Corrente do arco no ar-Schwarz	92
4.63	Condutância do arco no ar-Schwarz	92
4.64	Tensão do arco no ar-Thiel Modificado	94
4.65	Quadrado da Corrente do arco no ar-Thiel Modificado	94
4.66	Condutância do arco dentro no ar-Thiel Modificado	95
4.67	Tensão do arco dentro no ar-Mayr-Portela	95
4.68	Quadrado da Corrente do arco no ar-Mayr-Portela	96
4.69	Condutância do arco no ar-Mayr-Portela	96
B.1	Conversor Analógico-Digital	114

Lista de Tabelas

3.1	Resumo dos Modelos de Arco Elétrico	46
4.1	Dados do Circuito do Disjuntor	49
4.2	Parâmetros de Arco no Disjuntor modelo de Mayr	51
4.3	Parâmetros de Arco no Disjuntor- modelo de Schwarz	52
4.4	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Mayr	53
4.5	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Schwarz . .	54
4.6	Parâmetros do Arco no Ar	57
4.7	Resultados de Identificação de Parâmetros do Arco Secundário	58
4.8	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Mayr	81
4.9	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Schwarz . .	82
4.10	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Thiel Mo- dificado	85
4.11	Resultados de Identificação dos Parâmetros no Mayr-Portela	88
4.12	Resultados de Identificação dos Parâmetros no de arco no ar-Schwarz	93
4.13	Resultados de Identificação dos Parâmetros para o arco no ar-Thiel Modificado	93
4.14	Resultados de Identificação dos Parâmetros para o arco no ar-Mayr- Portela	93

Capítulo 1

Introdução

Um dos problemas principais em sistemas de potência é a modelagem correta dos componentes em faixas de frequência compatíveis como o fenômeno a ser realizado. Usualmente para a análise de fenômenos que não o comportamento em regime permanente, faz-se necessária uma representação mais detalhada da rede levando-se em conta o comportamento em função da frequência e até mesmo a inclusão de não linearidades. Portanto, a representação matemática dos equipamentos que compõem os sistemas de energia elétrica é ponto extremamente importante para a correta operação da rede, identificação correta de contingências e até mesmo do ajuste de equipamentos de proteção.

Dos diversos tipos de fenômenos que ocorrem na rede elétrica, optou-se nessa tese em focar na representação do arco elétrico. É um fenômeno não linear que ocorre quando da ruptura do dielétrico, podendo ocorrer dentro de equipamentos de manobra (disjuntores, pára-raios), ou na cadeia de isoladores de linhas aéreas de transmissão. Este último também é conhecido como “back-flashover” ou simplesmente “flashover”. No caso de disjuntores, a representação do arco torna-se importante para a representação da fase térmica na abertura dos disjuntores e na avaliação de defeitos como o chamado defeito quilométrico [1]. Para as linhas de transmissão aéreas, a representação correta do arco elétrico se faz necessária para avaliar adequadamente a viabilidade da operação monopolar [2], [3], [4].

Apesar do comportamento altamente não linear, o arco elétrico pode ser representado de forma macroscópica por um conjunto de equações diferenciais. A dificuldade principal é a identificação dos parâmetros envolvidos nessas equações, pois depen-

dente do modelo de arco adotado haverá um conjunto distinto de elementos a serem identificados. É interessante notar que, como será mostrado no item 1.3, apesar de uma grande gama de modelos de arco, pouco se fez com relação a identificação dos parâmetros do arco elétrico propriamente dito.

No presente documento, para o processo de estimação, o conjunto de equações que descreve o arco é formulado em espaço de estados tendo a condutância do arco como variável de estado. Em função do modelo de arco considerado, a entrada pode ser a tensão ou a corrente, o Capítulo II apresenta maiores detalhes da modelagem adotada.

1.1 Objetivos

O objetivo principal dessa tese é através de técnicas de estimação de estados obter uma metodologia de identificação dos parâmetros do arco elétrico independentemente o modelo de arco considerado. Para tanto considera-se diferentes configurações de rede, envolvendo simulações computacionais e montagens experimentais.

Na presente tese foi elaborada uma metodologia que realiza a identificação dos parâmetros do arco em dois estágios. No primeiro estágio aplica-se o filtro de Kalman nas equações linearizadas do arco elétrico para determinar as variáveis de estado (condutância). No segundo o método de máxima verossimilhança estima as matrizes A , B , C , D (que estão em função dos parâmetros do arco) na forma de espaço de estado. O procedimento de identificação como um todo pode ser compreendido como uma estimação dual visto que envolve tanto a estimação de estado como de parâmetro, então, as variáveis de estado e os parâmetros são obtidos na mesma iteração, como pode ser visto com mais detalhe no Capítulo II. Como ocorre no caso de métodos de otimização todo o processo depende da escolha com cuidado dos valores iniciais.

1.2 Motivação e Descrição do Trabalho

O método proposto permite identificar sistemas no modelo de caixa cinzenta, onde se tem definidas as equações diferenciais, e pode ser aplicado para identificação de

sistemas on-line, só com os dados que podem ser mensurados, e sem a necessidade de interromper o funcionamento dos mesmos.

Conhecendo-se o modelo matemático, a estimação dos parâmetros é de fundamental importância para a identificação e avaliação do arco elétrico. Analisando os modelos de arco existentes na literatura, como os modelos de duas constantes de tempo, observamos que é uma tarefa difícil e complexa aplicar diretamente um estimador comum para determinar os parâmetros, já que só conhecemos a entrada e saída, que no caso são tensões e correntes do arco. Sendo assim, o desafio foi encontrar algum método que se adeque ao nosso propósito. Avaliando os métodos de estimação existentes na literatura, encontramos um método que poderíamos utilizar, que é o método de estimação dual estados/parâmetros, onde se faz necessário colocar as equações do arco no modelo de espaço de estado.

Para esse trabalho, consideram-se dois casos de estimação de parâmetros. O primeiro lida com a modelagem do disjuntor, enquanto que o segundo caso lida com o arco no ar (arco secundário) para baixas correntes tanto para casos simulados assim como para dados experimentais.

Para estimar os parâmetros do arco, fizemos um rearranjo matemático, para colocar as equações do arco na forma de espaço de estado, com a condutância do arco como variável de estado. A saída (entrada) do modelo é a tensão (corrente) do arco dependendo do modelo de arco utilizado.

Para o caso de dados obtidos de simulação, montamos um circuito utilizando o simulink de MATLAB para representar arco no disjuntor e no PSCAD para representar arco no ar. Para identificar modelos distintos de arco implementados via simulação, e de forma a nos aproximarmos do comportamento das medias reais, acrescentamos ruído branco aos resultados da simulação.

Para o caso experimental, implementamos no laboratório de Corona um circuito para reproduzir o arco no ar. Foram medidas as tensões e correntes do arco para diferentes distancias entre eletrodos, variando de 1 a 5 cm, com correntes que não ultrapassaram 100 mA.

Nos dois casos, são utilizados os modelos de Schwarz, o de uma constante de tempo, o modelo de Thiel modificado, e o modelo de Mayr-Portela. Os modelos de Thiel e de Mayr-Portela consistem em uma conexão de dois sub arcos, seja em série

ou paralelo, com duas constantes de tempo. No caso de Schwarz e Mayr-Portela as “constantes de tempo” são dependentes da condutância do arco.

Uma aplicação importante possível através da montagem experimental é a verificação do comportamento da rede antes, durante, e após a ocorrência do arco. Para tanto, é necessário obter um equivalente caixa-preta da impedância/admitância terminal “vista” pelo arco. Este procedimento é realizado para faixas de frequências adequadas, supondo que a tensão que alimenta a rede é puramente senoidal.

Em resumo, desenvolvemos este trabalho em três etapas:

- Implementação do estimador dual estado/parâmetros para sistemas lineares na forma de espaço de estados, baseado no Filtro de Kalman(FK) para cálculo das variáveis de estado e Máxima verossimilhança(ML) para cálculo dos parâmetros, e um refinamento utilizando o método de Gauss-Newton para melhorar o desempenho do estimador.
- Cálculo de parâmetros do arco elétrico dentro do disjuntor e arco no ar, utilizando o estimador proposto, para casos vis simulação (simulink/MATLAB e PSCAD) e casos experimentais implementados no laboratório;
- Análise da interação arco-rede do domínio da frequência.

1.3 Revisão da Literatura Técnica

Na literatura, encontramos estudos do arco elétrico em diferentes situações, seja dentro de equipamentos de manobra ou nas linhas de transmissão.

Nos modelos encontrados na literatura técnica se opta por uma modelagem matemática relativamente simplificada, existem vários modelos de arco como o modelo de Cassie [5], Mayr [6], Thiel [1], Schavemaker [7], Habedank [8] para representação do arco do disjuntor; e Johns [9], Kizilcay [10] e Mayr-Portela [2], para citar apenas alguns, para representar o arco secundário. A seguir, discorreremos sobre alguns trabalhos encontrados na literatura, falando sobre sistemas lineares, técnicas de estimação de estado e de parâmetros, modelos de arco no ar e no disjuntor.

1.3.1 Fundamentos da Teoria de Estimação

Estimação é a determinação de grandezas físicas não observáveis a partir de grandezas mensuráveis. A estimação pode ser dividida em duas classes, a saber [11]:

- Identificação Experimental: Na identificação experimental, através de medições, obtém-se um modelo do sistema.
- Estimação: É a determinação dos estados do sistema a partir de medições das entradas e saídas desse sistema.

É importante rever o conceito de estimação para os casos em que temos diferentes medições e queremos determinar a melhor estimação. Entendemos por estimação o mecanismo para obtenção de um valor a partir de uma informação incompleta, lembrando que é importante obter a melhor estimação possível. Um método simples e usual para seu cálculo é minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a estimação e as medições como mostram Nahi [11] e Eykhoff [12].

De acordo com Vladimir Strejc [13], alguns métodos são utilizados para o sistema de identificação, bem como determinar os parâmetros do modelo utilizando métodos determinísticos, método de mínimos quadrados, e o método de Máxima verossimilhança.

1.3.1.1 Estimadores de Estado

Existem dois tipos de estimadores de acordo com a sua forma de cálculo:

- Estimação seqüencial, onde são tratados o filtro de Kalman em tempo discreto e tempo contínuo, contínuo-discreto, e filtro de Kalman estendido para casos não lineares. Em todos os casos é considerada a contaminação com ruído branco.
- Estimação por batelada, alisamento de intervalo fixo, alisamento de ponto fixo, alisamento com atraso-fixo.

Em 1960, R.E. Kalman publicou seu famoso artigo descrevendo uma solução recursiva para o problema de filtragem linear para dados discretos [14]. Devido aos grandes avanços em computação digital, o Filtro de Kalman foi assunto de muitas

pesquisas e aplicações extensas, particularmente na área de navegação autônoma ou assistida.

O Filtro de Kalman é um conjunto de equações matemáticas que é capaz de estimar de forma eficiente o estado de um processo, de maneira a minimizar o quadrado do erro. Este filtro é muito poderoso em diversos aspectos: sustenta estimações do passado, presente, e do futuro, e pode fazer isso mesmo quando o estado do sistema modelado é desconhecido. Podemos encontrar na literatura uma grande variedade de artigos e livros que falam do Filtro de Kalman, já que este é o método mais eficiente de determinar as variáveis de estado de um sistema dinâmico linear.

Alguns artigos descrevem uma solução recursiva para um problema de filtragem linear para dados discretos, fornecendo o desenvolvimento teórico do filtro de Kalman discreto e do filtro de Kalman estendido [15]. J. Bosco e W.C.Amaral [16] discorrem sobre sistemas estocásticos e aplicação de Filtro de Kalman para estimação de estado de sistemas lineares. Eles apresentam uma aplicação baseada na rotina de um toolbox do MATLAB chamado de `kalmdemo`, onde implementam um exemplo para determinar o estado de um sistema linear discreto utilizando o filtro de Kalman; trata-se de um algoritmo pronto que pode ser aproveitado.

Maybeck [17] introduz a idéia geral do Filtro de Kalman, enquanto que uma discussão mais completa pode ser encontrada em [18], e em maiores detalhes em incluem [19, 20, 21, 17, 22, 23].

1.3.1.2 Estimação de Parâmetros

Os métodos para a estimação de parâmetros de um sistema linear em espaço de estados utilizam os dados aferidos das entradas e saídas do sistema, onde se assume que a ordem do modelo é conhecida “a priori” [24]. Uma vez que o modelo é especificado, e os dados foram coletados, o objetivo é encontrar um bom método de ajuste, para encontrar os valores dos parâmetros que se ajustem aos dados; esse procedimento é chamado de estimação de parâmetros [23].

Existem dois métodos gerais que são muito utilizados para a estimação de parâmetros. Eles são os métodos de estimação por mínimos quadrados (MQ) e o método de Máxima Verossimilhança (ML).

1.3.1.3 Método de Mínimos Quadrados

Este método foi tratado de forma independente por Gauss e Legendre [25] e é um dos métodos mais conhecidos e utilizados nas diversas áreas do conhecimento. Gauss, durante suas observações astronômicas afirmou que [26]:

“O valor mais provável de grandezas desconhecidas é o que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre o valor medido e o valor calculado, ponderado pelo grau de precisão da medida”

Existem dois tipos de estimação através dos mínimos quadrados. Na estimação “por batelada”, tendo definido a estrutura do modelo, monta-se a matriz de regressores e resolve-se o problema numérico “de uma vez só”. O “método recursivo” é utilizado quando os dados são medidos e disponibilizados sequencialmente. A cada período de amostragem, um sistema qualquer de coleta de dados fornece medições correspondentes àquele instante, o procedimento é conhecido como estimação recursiva [26]. Técnicas recursivas são muito úteis por dois motivos. O primeiro deles é que é possível, utilizando técnicas recursivas, estimar os parâmetros de um determinado modelo à medida que os dados do processo são disponibilizados. Isto é útil quando os parâmetros do processo variam lentamente em função de não linearidades, desgaste, falhas, dentre outros. Em segundo lugar, tais algoritmos são também úteis na resolução de problemas numéricos cuja solução em batelada fica difícil, como demonstrado em [26].

1.3.1.4 Máxima Verossimilhança

O procedimento de estimação por máxima verossimilhança geralmente não requer um conhecimento ‘a priori’ para a função densidade de probabilidade do parâmetro [23]. Este é um método cujo objetivo é minimizar o logaritmo da função de verossimilhança, com o qual determinamos os parâmetros [27]. John Crassidis e John Junkins [23] discorrem com mais detalhe sobre o assunto.

Em [28], Bergboer apresenta um método de estimação de parâmetros utilizando o método de ML para Modelos Lineares multivariáveis, em espaço de estado, onde utiliza o método de Levenberg-Marquart [29] como algoritmo de otimização. B. David e G. Bastin [30] mostram uma aplicação de ML para estimação de parâmetros para

sistemas dinâmicos não lineares. Em [31], Bierman fala de um método de estimação de parâmetros em sistemas lineares dinâmicos, através de um processo iterativo que envolve a gradiente do negativo do logaritmo da função de verossimilhança e a Matriz de informação de Fisher. Como se faz necessária a implementação do Filtro de Kalman, ele sugere que em alguns casos a aplicação do filtro de informação de mínimos quadrados (MQ) pode trazer melhores resultados.

1.3.1.5 Método Dual de Estimação de Estado/Parâmetros

Tendo um sistema tipo caixa preta do qual só conhecemos as equações diferenciais no espaço de estado e os dados de entrada e saída, onde a determinação dos parâmetros não pode ser feita diretamente ou depende do conhecimento prévio das variáveis de estado do sistema, é necessário implementar um algoritmo onde possamos determinar as variáveis estados e os parâmetros no mesmo algoritmo. Shumway e Stoffer [32], apresentam um algoritmo para sistemas lineares dinâmicos onde a matriz de observação, C , é conhecida. Desde então, muitos autores tem apresentado artigos relacionados com esse tema [32, 33]. Em 1996, Ghahramani e Hinton [24] mostram a determinação de parâmetros para Sistemas Lineares Dinâmicos através do método de Máxima Verossimilhança. Esse procedimento é uma modificação do trabalho originalmente apresentado por Shumway [32]. Em 1997, Deng e Shen [34] descrevem um algoritmo de decomposição para estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos lineares com a formulação e espaço de estado com parâmetros do sistema desconhecidos. Tendo como objetivo unificar técnicas para uma eficiente estimação de parâmetros, é desenvolvido um algoritmo de Maximização do valor esperado em conjunto com o convencional estimador de filtro de Kalman, estimando os parâmetros através do método de ML. O modelo considerado por Deng e Shen é mostrado em [34].

1.3.2 Modelagem e identificação do Arco Elétrico

1.3.2.1 Arco no Disjuntor

As primeiras equações diferenciais para representar o comportamento do arco elétrico foram desenvolvidas por Cassie em 1939 [5] e por Mayr em 1943 [6]. As outras publicações baseiam-se nestes modelos ou na combinação das duas. Habedank em

1988 [8] apresenta seu modelo, que consiste na combinação dos modelos de Cassie e Mayr, representa uma conexão em serie dos dois modelos, onde se trabalha com quatro parâmetros constantes, reproduzindo melhor o comportamento do arco em comparação com os modelos de Cassie e Mayr.

Em 1971, Schwarz [35] apresenta um modelo modificado de Mayr, com a “constante de tempo” e a potência de resfriamento dependentes da condutância. Van der Sluis, Rutgers, e Koreman [36] desenvolvem um modelo modificado de Mayr onde a potência de resfriamento é dependente da corrente. Smeets e Kertész [37] apresentam seu modelo de arco de KEMA [37] desenvolvido a partir de um modelo modificado de Mayr, representado por três arcos em serie. Schavemaker [38] também apresenta seu modelo a partir do modelo modificado de Mayr, com uma constante de tempo e a potência de resfriamento em função da potência elétrica de entrada. Todos estes modelos são detalhados no Capítulo 4.

Bizjak, Zunko e Povh [39] apresentam um modelo combinado para representar o comportamento de um disjuntor em SF_6 para simulação em programas digitais.

Na estrutura do modelo combinado, o disjuntor é representado como um modelo de dois pólos com uma resistência variável. Quatro diferentes modelos são utilizados para representar o comportamento do disjuntor:

- Modelo para abertura e fechamento do disjuntor, representados por resistências constantes de $10^{-6}\Omega$ e $10^6\Omega$, respectivamente.
- Modelo para o inicio da descarga do arco durante a abertura de fase: é utilizado um modelo estático com base nas características da tensão e corrente adicionando uma função tempo. São calculadas uma corrente e uma tensão máxima e a condutância é obtida a cada intervalo de tempo em função de $e(t)$.
- Modelo de arco para a fase de extinção do arco: é representado por dois arcos em serie, cada um representado pelos modelos de Mayr e Cassie.
- Determinação do sucesso na extinção do arco; a idéia é que o arco seja extinto num disjuntor real quando a corrente passa por zero. Entretanto, pode haver reignição se a resistência media entre contatos não for suficientemente alta.

Em 2005, Nitu e Anghelita [40] apresentam uma maneira de determinar

parâmetros através do método Asturiano (mostrado no apêndice E) para disjuntores de baixa tensão a vácuo utilizando o modelo de arco de Mayr.

Em 2005, Martinez [41] avalia o comportamento do arco em disjuntores em ar comprimido e em SF_6 . Na modelagem do arco, utiliza uma combinação de modelo modificado de Cassie e Mayr. O modelo final resulta da representação de dois arcos em serie: um arco com modelo modificado de Mayr e outro arco com modelo de Cassie. Avdonin [42] propõe um modelo que ele considera adequado para o caso de disjuntores em ar comprimido e em SF_6 . O modelo de Avdonin é derivado de um modelo modificado de Mayr.

A instabilidade do arco em disjuntores pode ocorrer a alta frequência (de algumas dezenas a centenas de kHz) e próxima a corrente zero (até algumas dezenas de Amperes). É de crucial importância demonstrar que problemas complexos podem ser estudados através de dados de ajuste fino e de realização de análises de sensibilidade [42].

Em 1993, Habedank [43], [44] mostra seu novo modelo que descreve o comportamento de um arco elétrico. O modelo apresentado é uma conexão em serie de dois sub-arcos, um descrito pelo método de Mayr e o outro pelo método de Cassie. Portanto, o modelo tem quatro parâmetros constantes que descrevem o comportamento do arco elétrico. Abbaoui e Cheminat [45] detalharam o comportamento do plasma e dos gases envolvidos no arco. Mais detalhes sobre a potência de resfriamento, dentro de um disjuntor, podem ser encontrados em [46]. Estudos sobre o disjuntor e detalhes do comportamento do arco dentro de um disjuntor são tratados com mais detalhes no Capítulo 3 e nas referências [47, 48, 49].

1.3.2.2 Métodos utilizados para a determinação dos parâmetros do arco num Disjuntor

Em 1999, Giménez e Hevia [50] descrevem a utilização do método Asturiano para cálculo de parâmetros do arco elétrico a partir de dados de teste. Em comparação com o método Amsinck [47], a principal vantagem do método Asturiano é que pode ser utilizado em situações onde não há reignição, e só um teste é suficiente.

Para o caso de estimação de parâmetros a partir de simulações de disjuntor em SF_6 , Orama-Exclusa e Bienvenido Rodriguez [51] utilizam o modelo Cassie-Mayr

implementado em EMTP, usando uma rotina de otimização para determinar os parâmetros do arco em MATLAB. A metodologia utilizada não é confiável quando há ruído nos dados obtidos, o que normalmente acontece em situações reais.

Portela e Oliveira [52] apresentam um método que é aplicado a arcos estacionários a partir de dados experimentais. Foi utilizado o “método incremental” para determinar os parâmetros do arco dentro do disjuntor utilizando o modelo de arco Mayr-Portela.

1.3.3 Modelagem de Arco Secundário

Algumas metodologias de estudo para análise de arco secundário, considerando a modelagem da linha numa gama de frequência adequada para o fenômeno de estudo sob análise e a modelagem do arco no ar, durante a abertura monofásica, podem ser encontrados em [4]. Em 2003, Prikler [53] fala da importância do arco secundário no desempenho de autorreligamento das linhas de transmissão em HV/EHV. O arco é modelado utilizando o ATP-EMTP, utilizando o modelo de Johns et al para arco primário e secundário respectivamente, como nos mostram Kizilcay [10] e Pniok [9]. Baseado em resultados de diferentes medições de arco sob diferentes condições, são observados dois diferentes fenômenos de extinção de arco secundário:

- Instantânea: “break-off” depois da desconexão da corrente de curto circuito
- Extinção lenta com incrementos do comprimento do arco, tensão e resistência de arco.

O segundo tipo de extinção do arco poderia ser atribuída a casos em que a corrente de curto circuito interrompida foi relativamente baixa. O tipo de extinção mais provável ocorre quando se tem influência da velocidade do vento, baixa corrente de arco secundário e a recuperação de tensão. Este efeito é adicionalmente suportado pela convecção do plasma. Conseqüentemente, a corrente de arco secundário não pode manter a descarga suficientemente condutiva e o arco se extingue num curto período de tempo. Este tipo de extinção de arco não pode ser reproduzido por meio de simulações digitais, devido às condições probabilísticas dentro e fora do caminho do arco. Este artigo descreve dois modelos de arco secundário, que são apropriados para estudos do comportamento de autorreligamento. O arco de defeito

é representado por uma resistência que varia com o tempo implementado no ATP-EMTP, cujo valor é obtido pela solução da equação diferencial que descreve o arco a cada intervalo de tempo utilizando TACS/MODELS. Ambos os modelos de arco são baseados na teoria estendida da interrupção do arco e levam o equilíbrio da energia térmica da coluna do arco em consideração.

Através de exemplos de simulação, demonstra-se a influencia dos parâmetros do arco sobre a duração e comprimento alcançados no momento da extinção. O alongamento e a variação da constante de tempo do arco, dependendo do seu comprimento, são os fatores mais importantes a esse respeito. A extinção do arco é o fenômeno mais difícil a ser definido do arco secundário.

Para a identificação dos parâmetros do arco secundário, a partir de dados de testes de falta, Prikler e Kizilkay [54] mostram o comportamento dinâmico do arco, que é representado com uma resistência que varia no tempo implementado no ATP-EMTP. Os modelos utilizados são mencionados acima. Os parâmetros do Arco secundário são extraídos a partir de dados de testes no campo através de uma integração numérica de tensões e correntes de arco.

Algumas considerações, mostradas neste artigo são de grande importância. Os resultados obtidos do arco secundário no laboratório experimentalmente são diferentes do arco real, devido à velocidade do vento, às técnicas de iniciação do arco, à construção da linha, compensação shunt, entre outros, e principalmente a configuração da rede que tem uma influencia muito grande no comportamento do arco secundário. Devido a um comportamento complexo e altamente aleatório do arco secundário é muito difícil reproduzir a duração exata do arco através de simulações digitais. A estimação dos parâmetros dependendo dos métodos utilizados pode ter erros grosseiros. Os circuitos de teste utilizados em muitos laboratórios de Alta Tensão para prever os tempos de extinção do arco secundário são montados só com elementos simples, e assim o comportamento da rede e a influência dela durante o período de extinção parcial podem não ser considerados.

Em 1991, Portela et al. [2] apresentam o modelo Mayr-Portela que é um modelo combinado com duas constantes de tempo térmicas, que representa melhor o comportamento do arco que os modelos com constantes de tempo simples utilizados comumente. O modelo utilizado é o modelo de Thiel Modificado, representado por

dois sub-arcos em serie, onde as “constantes de tempo” são dependentes da condutância e uma delas representa os fenômenos mais rápidos que incluem o fenômeno ânodo-cátodo e a outra os fenômenos mais lentos. Borges [55] detalha a modelagem do arco Mayr-Portela e a aplicação experimental. O que diferencia esse modelo dos encontrados na literatura é a interação entre os dois sub-arcos. A modelagem é realizada a partir de dados experimentais em corrente contínua, considera que o arco é estacionário e as perturbações são realizadas por meio de impulsos de corrente injetados no arco, para avaliação do seu comportamento dinâmico.

Em 2005, Kizilcay e La Seta [10] apresentaram uma simulação digital de um arco (primário) de falta fase-terra, em redes de media tensão, enquanto Tavares [3] mostra a importância da otimização dos parâmetros do sistema de transmissão, visando o estudo do comportamento do arco secundário. Megahed et al. [56] mostram um exemplo de avaliação do arco primário e secundário num sistema real. A falta simulada é uma falta fase-terra em uma linha de transmissão de 220 kV.

Em 2005, Mamis [57] apresentou uma técnica interessante em espaço de estado para análise transitória de defeitos de arco em sistemas de potência, utilizando um modelo de resistência dinâmica dependente do tempo. É um método útil para analisar as tensões e correntes transitórias no defeito na linha de transmissão. Este tipo de defeito acontece em forma de arco, que pode ser representado como um resistência variável no tempo ou em função da corrente.

1.3.4 Avaliação Arco-Rede

O objetivo é analisar o comportamento da rede e do arco, considerando que as constantes de tempo da rede influenciam sobremaneira a fase de amortecimento inicial das oscilações. Um ponto importante a ser abordado na pesquisa é o impacto da precisão de dados na representação da rede e seu impacto na modelagem do arco [4]. Por exemplo, tanto nos casos simulados, como na modelagem experimental a ser desenvolvida, a rede é conhecida com um grau de precisão bastante satisfatório. Contudo, tal fato está longe de ser real em casos práticos. Sendo assim, faz-se necessário uma análise do comportamento da rede na faixa de frequência adequada com o espectro envolvido na modelagem do arco e uma análise para avaliar a interferência entre a rede e o arco no que se refere a identificação dos parâmetros

[4].

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em cinco capítulos. No Capítulo 1, fazemos uma breve introdução discorrendo sobre o trabalho realizado, assim como uma revisão da literatura sobre arco elétrico e métodos de estimação e identificação, discorrendo sobre artigos e livros que tratam destes assuntos. Este capítulo se divide em duas partes, sendo a primeira uma revisão bibliográfica sobre os métodos e exemplos de aplicação de identificação e estimação, e a segunda parte, uma revisão sobre a metodologia sobre arcos elétricos, tanto no disjuntor como no ar (“arco secundário”).

No Capítulo 2, abordamos a teoria sobre identificação de sistemas dinâmicos na forma de espaço de estado, estimadores de estado (falando principalmente sobre o Filtro de Kalman), estimadores de parâmetros (discorrendo sobre o método de Máxima Verossimilhança), e estimadores duais estado/parâmetro, onde se aborda a utilização dos métodos.

No Capítulo 3, é apresentada a teoria e a modelagem de arcos elétricos, sejam eles dentro de um disjuntor ou no ar chamado de arco secundário. Abordamos também o funcionamento de um disjuntor e o comportamento e a modelagem do arco elétrico, e apresentamos a modelagem e a extinção do arco secundário.

No Capítulo 4, falamos sobre a identificação do arco elétrico para casos via simulação e casos experimentais. Estes capítulo está subdividido em duas partes. Na primeira, discorreremos sobre a identificação dos arcos elétricos, utilizando modelos encontrados na literatura. As equações do arco são colocadas na sua forma de espaço de estado, e discretizadas, de maneira que o sistema fica na sua forma de espaço de estado discreto. Os modelos de arco são implementados em Simulink de MATLAB, para arcos dentro de um disjuntor, e em PSCAD para arco secundário. Aplicando o método proposto, identificação dual, calculamos os parâmetros do arco elétrico de acordo com alguns modelos do mesmo. Apresentamos os resultados em dois quadros comparativos.

Na segunda parte, abordamos a identificação do arco elétrico para casos experimentais, utilizando os métodos de estimação propostos. Dados obtidos no labo-

ratório são utilizados para determinar os parâmetros do arco elétrico, tanto para o disjuntor como para o caso do arco no ar.

Capítulo 2

Identificação de Sistemas

A identificação correta das dinâmicas envolvidas é fundamental e por tanto demanda a suposição da adequação de uma determinada equação diferencial(ou conjunto de equações diferenciais).

2.1 Sistemas Dinâmicos

O comportamento de um sistema dinâmico, como um sistema de potência, pode ser descrito por uma equação diferencial ordinária.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u, t) \\ y &= g(x, u)\end{aligned}\tag{2.1}$$

onde, x representa as variáveis de estado, u a entrada do sistema, t o tempo e y as variáveis de saída, que são expressos em função das variáveis de estado e da entrada.

2.2 Representação em Espaço de Estado

Tradicionalmente, existem duas diferentes descrições matemáticas para componentes de um sistema de potência:

- representação em espaço de estado.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A x + B u \\ y &= C x + D u\end{aligned}\tag{2.2}$$

- Convolução, i.e. relação direta terminal utilizando matrizes de resposta ao impulso.

$$i = \int_0^{\infty} h(\tau)v(t - \tau)d\tau \quad (2.3)$$

O conceito de estado é fundamental para a abordagem de espaço de estado. O estado de um sistema representa a quantidade mínima de informação sobre o sistema. Um conjunto de variáveis do sistema linearmente independentes podem ser utilizados para descrever o estado do sistema, e são chamado de variáveis de estado. Formam um conjunto mínimo das variáveis dinâmicas, que junto com as entradas do sistema, prove uma completa descrição do comportamento do sistema. As variáveis de estado podem ser quantidades físicas num sistema tal como o ângulo, velocidade, tensão, corrente ou também podem ser variáveis matemáticas abstratas associadas com equações diferencial diferenciais descrevem a dinâmica do sistema.

No caso de um sistema de potência, a análise das variáveis de estado (ou espaço de estado) consiste em representa-lo por um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem, que são resolvidas por integração numérica. Por exemplo num caso específico, na escolha das variáveis de estado, embora a corrente do indutor e a tensão do capacitor podem ser as variáveis de estado, é melhor utilizar o fluxo magnético concatenado (ϕ) e a carga do capacitor (Q). Nesse caso as entradas e saídas são tensões e correntes.

2.2.1 Exemplo Representação de um Circuito RLC em Espaço de Estado

Como exemplo de aplicação temos um circuito RLC como mostrado na Fig.2.1

Fazendo $i(t) = dq/dt$ a equação de malha de tensão

$$L\frac{d^2q}{dt^2} + R\frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = v(t) \quad (2.4)$$

É conhecido o fato que, uma equação diferencial ordinária com coeficientes reais de ordem “n” pode ser convertida em “n” equações de primeira ordem, então o seguinte sistema pode ser escrito:

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= i \\ \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L} \left[-\frac{1}{C}q - Ri + v(t) \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

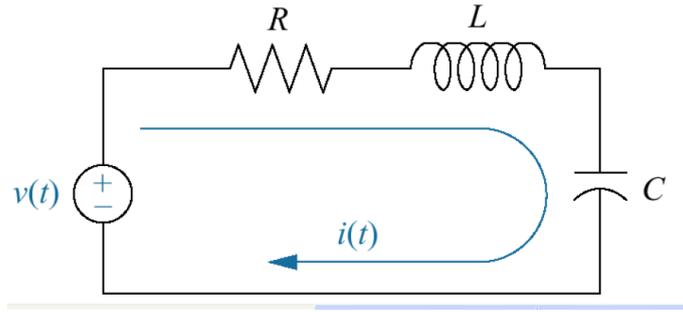


Figura 2.1: Circuito RLC

O sistema de equações acima, associado a uma equação de saída, corresponde a representação no espaço de estado sistema. A equação de saída é:

$$v_L(t) = -\frac{q(t)}{C} - Ri(t) + v(t) \quad (2.6)$$

As equações de estado podem ser representada, conforme mostra (2.2), sendo

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dq}{dt} \\ \frac{di}{dt} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} q \\ i \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}; u = v(t);$$

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C} & -R \end{bmatrix}; D = 1$$

De acordo com a teoria de identificação e estimação de sistemas na forma de espaço de estado temos:

- Estimação das variáveis de estado conhecendo as matrizes A, B, C, D e as entradas e saídas.
- Estimação das matrizes A, B, C, D conhecendo as variáveis de estado e as entradas e saídas.
- Estimação da variáveis de estado e das matrizes A, B, C, D no mesmo estagio conhecendo as entradas e saídas.

Esse último é chamado de estimação dual de estado e parâmetros. Os três casos são explicados com mais detalhes nos seguintes seções.

2.2.2 Estimação das variáveis de Estado

Quando resolvemos problemas práticos por meio da teoria de espaço de estado, freqüentemente nos deparamos com casos onde qualquer uma das variáveis de estado

ou algum componente do vetor de estado não são mensuráveis. Isto geralmente corresponde a sistemas complexos com parâmetros distribuídos. Então, para poder usar a teoria de espaço de estado para o controle desses sistemas, devemos calcular o valor estimado da variável de estado não mensurável do sistema por meios de entradas e saídas mensuráveis do sistema, por exemplo tensões e correntes de um circuito.

Assumimos que as matrizes A , B , C , D do modelo matemático em espaço de estado são conhecidas, mas os componentes do vetor estado não são mensuráveis. Eles devem, entretanto, ser determinados indiretamente via cálculos que envolvem dados mensuráveis como a entrada e saída do sistema. Assumindo também que as entradas e saídas da planta estão contaminadas com ruídos. Um dos métodos mais conhecidos para a estimação das variáveis de estado é método chamado Filtro de Kalman.

2.2.2.1 Filtro de Kalman

A versão discreta do filtro de Kalman foi publicada por primeira vez em 1960 [14]. É uma solução no domínio do tempo no espaço de estado. Para poder generalizar, assumimos que o sistema está contaminado com ruído branco. Quer dizer, se a entrada aleatória atual é um espectro racional, pode ser expressa como a saída de um filtro linear onde sua entrada é contaminada por ruído branco.

O problema de estimação de estado no filtro de Kalman pode ser resolvido utilizando varias aproximações. Entre muitas outras possibilidades, descreveremos um procedimento recursivo para a derivação de filtro de Kalman, que é extraordinariamente simples e representa uma aproximação natural para chegar a uma relação resultante de Kalman recursivo [15], [16], [23].

2.2.2.2 O Processo a Ser Estimado

O filtro de Kalman aborda o problema geral de tentar estimar o estado de um processo controlado no tempo discreto que é governado por

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (2.7)$$

com a medida $y \in \mathfrak{R}^m$ que é

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (2.8)$$

As variáveis aleatórias w_k e v_k representam o ruído do processo e da medida (respectivamente). Podemos considerar que elas são independentes (entre si), brancas, e com distribuições probabilísticas normais.

$$\begin{aligned} p(w) &\sim N(0, Q) \\ p(v) &\sim N(0, R) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Na prática, as matrizes da covariância do ruído do processo Q e a covariância do ruído de medida R podem mudar com cada medida ou espaço de tempo; aqui, entretanto, assumimos que elas são constantes. A matriz A de $n \times n$ na equação diferencial (2.7) relaciona o estado no passo $k-1$ anterior ao estado no passo atual k , na ausência tanto de uma função que a comande quando do ruído do processo. Note que, na prática, a matriz A poderia mudar em cada passo, mas aqui nós assumimos que ela é constante. A matriz B de $n \times n$ relaciona a entrada opcional de controle $u \in \mathfrak{R}^l$ ao estado x . A matriz C de $m \times n$ na equação de medida (2.8) relaciona o estado à medida y_k . Na prática, C pode mudar com cada medida ou passo, mas aqui assumimos que ela seja constante.

A Fig.2.2 mostra um diagrama mais detalhado de um sistema expresso em variáveis de estado com ruídos na entrada e na saída. E a Fig.2.3 mostra o sistema com o filtro de Kalman.

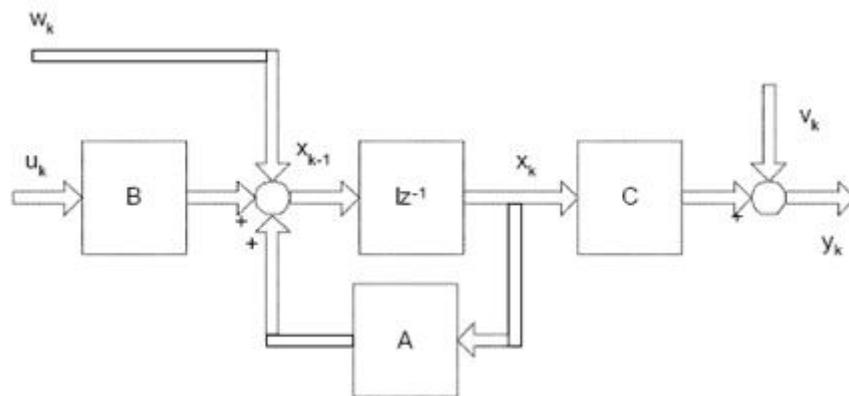


Figura 2.2: Sistema Expresso em Variáveis de Estado com Ruídos na Entrada e na Saída

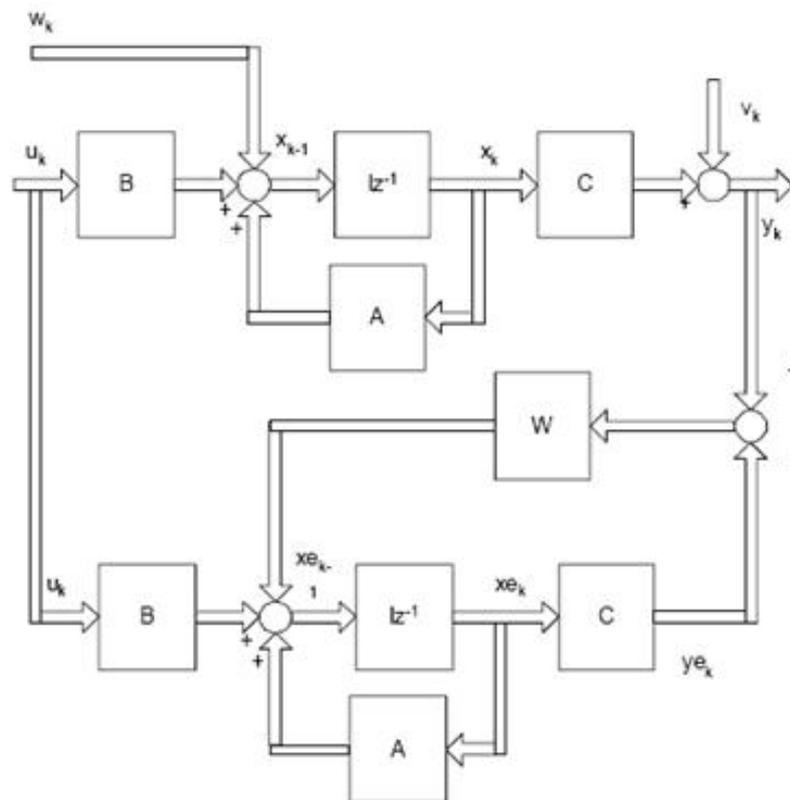


Figura 2.3: Sistema com o Filtro de Kalman

2.2.3 Estimação de Parâmetros A , B , C , D Matriciais

A estimação de parâmetros é definida como a determinação experimental de valores dos parâmetros que governam a dinâmica e/ou o comportamento linear ou não linear, assumindo que a estrutura do modelo do processo (variáveis de estado) é conhecida. Assumimos que as matrizes A , B , C e D do modelo matemático em espaço de estado não são conhecidas, mas os componentes do vetor estado são mensuráveis. Então, utilizando métodos matemáticos, podemos determinar os parâmetros através de dados mensuráveis como a entrada e saída do sistema, assumindo também que as entradas e saídas do sistema estão contaminadas com ruídos. Na literatura existem vários métodos de estimação de parâmetros. Entre os mais conhecidos estão os métodos de mínimos quadrados, método de Máxima Verossimilhança, método de observadores, método de subespaços entre outros.

Nesse trabalho utilizamos o método de Máxima verossimilhança, por considerarmos ser um dos métodos mais completos e eficientes de estimação de parâmetros.

2.2.3.1 Máxima Verossimilhança

Este método foi introduzido por Fisher. A idéia básica é construir uma função, que contenha os dados e os parâmetros, chamada de função verossimilhança. O valor estimado é então obtido como valor dos parâmetros que otimizam a função. A função de verossimilhança é essencialmente a densidade da probabilidade das observações. Para determinar a função de verossimilhança, é necessário ter um conhecimento “a priori” que possibilita escrever a densidade de probabilidade condicional das saídas observadas. A determinação da distribuição condicional é essencialmente um problema de predição, e a função de verossimilhança pode ser expressa como um produto das densidades condicionais do erro estimado.

O método da Máxima Verossimilhança gera estimativas para as quantidades desconhecidas que maximizam a probabilidade de obter o conjunto de dados observados. Embora fundamentalmente diferente da variância máxima, nós demonstraremos que, sob a premissa do processo do erro de medição do ruído gaussiano de média zero, tanto a probabilidade máxima, quanto a estimação da variância mínima, gerarão exatamente os mesmos resultados para a estimação de mínimos quadrados.

Começamos a falar de máxima verossimilhança considerando primeiro a função

da densidade da probabilidade, que é uma função das medidas e parâmetros desconhecidos, denotados por $f(\tilde{y}; x)$. Com propósitos de simplificação, fazemos com que \tilde{y} seja uma amostra aleatória de uma distribuição gaussiana simples. A função de densidade é dada por

$$f(\tilde{y}; x) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2} \right)^{m/2} \exp\left[-\sum_{i=1}^m (\tilde{y}_i - \mu)^2 / (2\sigma^2)\right] \quad (2.10)$$

Evidentemente, a distribuição de Gauss é uma função exponencial monotônica para a média μ e variância σ^2 . Devido ao aspecto monotônico da função, o ajuste pode ser obtido ao se tomar também o logaritmo natural da equação (2.10), o que leva a:

$$\ln[f(\tilde{y}; x)] = -\frac{m}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m (\tilde{y}_i - \mu)^2 \quad (2.11)$$

O ajuste leva imediatamente a um problema equivalente de otimização quadrática para maximizar (2.11). Isto leva ao conceito de estimação de máxima verossimilhança, que é descrito a seguir. Dado \tilde{y} , a estimativa de máxima verossimilhança x é o valor de x que maximiza $f(\tilde{y}; x)$, que é a probabilidade de que x resulte na \tilde{y} medida. A função de probabilidade $L(\tilde{y}; x) = \prod_{i=1}^p f_i(\tilde{y}; x)$ é também uma função de densidade da probabilidade, onde p é o número total de funções de densidade (um produto do número de funções de densidade, conhecida como densidade comum, é também uma função de densidade em si mesma). O objetivo do método de máxima verossimilhança é escolher como nossa estimativa dos parâmetros desconhecidos x o valor para o qual a probabilidade de obter as observações \tilde{y} seja maximizada. Muitas funções de probabilidade contêm termos exponenciais, que podem complicar a matemática envolvida na obtenção da solução. Entretanto, como $\ln[L(\tilde{y}; x)]$ é uma função monotônica de $L(\tilde{y}; x)$, encontrar para maximizar é equivalente a maximizar $\ln[L(\tilde{y}; x)]$. Segue então que para um máximo nós obtemos o seguinte condição necessária

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \ln[L(\tilde{y}; x)] \right\} \Big|_{\hat{x}} = 0 \quad (2.12)$$

sendo a condição suficiente dada por

$$E\left[-\frac{\partial^2}{\partial x \partial x^T} \ln[L(\tilde{y}; x)]\right] = I(\tilde{y}; x) \quad (2.13)$$

onde $[I(\tilde{y}; x)]^{-1}$ é conhecido como o limite inferior de Cramer-Rao, pois não existe outro estimador consistente do vetor \hat{x} que tenha variância menor.

A equação (2.13) pode ser definida como negativa. A equação (2.12) é muitas vezes chamada de equação de densidade de probabilidade.

A máxima verossimilhança fornece uma boa aproximação para problemas de estimação de parâmetros. Isto significa que estimativas de máxima verossimilhança podem ser desenvolvidas para uma grande variedade de situações de estimação. Métodos de máxima verossimilhança possuem desejáveis propriedades matemáticas e de otimização [40]. Ao contrário de alguns processos de otimização nos quais se busca minimizar uma função objetiva, no método de Máxima Verossimilhança busca-se maximizá-la. Em alguns casos é conveniente trabalhar com o negativo da função de máxima verossimilhança, tendo um sistema linear dinâmico dado por

$$\begin{aligned}x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \\y_k &= Cx_k + v_k\end{aligned}\tag{2.14}$$

onde $E x_0 = \mu_0$ e $E(x_0 x_0^T) = P_0$

Num problema de estimação de parâmetros baseados em máxima verossimilhança, geralmente é melhor trabalhar com o negativo da função verossimilhança. A função custo para o sistema mostrado na equação (2.14) com respeito a θ é

$$J(\theta) = -\log L(x, y, \theta)\tag{2.15}$$

onde θ é vetor que contem os parâmetros desconhecidos em A, B, C, D, Q e R .

Assumimos que não existem restrições na estrutura nas matrizes do sistema. Quando as variáveis de estado são não observáveis, as formas de previsão e alisamento do filtro de Kalman seriam utilizadas para estimar o estado x (avaliado continuamente). Os valores de previsão e alisamento no estimador de filtro de Kalman dos valores iniciais assumidos pelos parâmetros do sistema. As novas estimativas para os parâmetros do sistema podem ser obtidas por uma técnica iterativa utilizando um algoritmo de maximização do valor esperado (EM).

2.3 Técnicas e Implementação da Rotina de Estimação Dual de Estado e Parâmetros

Na literatura, encontramos um grande variedade de informações com relação à estimação de parâmetros e de estado, porém obtidas individualmente ou em separado,

ou seja, (1) estimação das variáveis de estado, conhecendo os parâmetros, e as entradas e saídas do sistema e (2) estimação dos parâmetros, conhecendo as variáveis de estado, e as entradas e saídas do sistema. Então, podemos afirmar que existem dois casos de estimação:

- **Caso 1. Perfeita observação do estado x .** Se a série de dados de $x(t)$, os estados do sistema são completamente observáveis, então por aplicação direta de um método de estimação podem ser calculados os valores dos parâmetros.
- **Caso 2. Estado incompleto ou não observável x .** Caso os estados do sistema não sejam observáveis e a determinação dos parâmetros dependa da série de dados $x(t)$, precisamos das séries observadas $y(t)$, como evidenciado na equação (2.14) e são valores suficientes para estimar os parâmetros. Este caso é chamado de estimação dual de estado/parâmetros.

O método de estimação dual é uma técnica relativamente nova, e é de grande utilidade em sistemas onde os estados e os parâmetros não são mensuráveis e só podem ser determinadas indiretamente, que são os casos de estimação/identificação on-line, onde só temos dados de entrada e saída.

A rotina de estimação dual pode ser dividida em duas partes:

1. Sistemas Lineares: dado um sistema de equações em espaço de estado, como mostrado na equação (2.12), onde as matrizes dos parâmetros são constantes, teríamos os seguintes passos:
 - Discretização com o método de “Zero-Order Hold”.
 - Filtro de Kalman para estimação das variáveis de estado.
 - Máxima Verossimilhança para determinar os parâmetros.
 - Gauss Newton como método de otimização.
2. Sistemas Não Lineares: para um sistema como mostrado na equação (A.3), temos duas alternativas na ordem de discretização e linearização (o sistema pode ser linearizado e depois discretizado ou vice versa). O resumo de Estimação dual para um sistema linear, seria:



Figura 2.4: Diagrama geral da rotina de Estimação dual

- Linearização, em torno de um ponto de operação. Teríamos o sistema na sua forma de espaço de estado dado por:

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t) \end{aligned} \quad (2.16)$$

- Discretização com o método de “Zero-Order Hold”.
- Filtro de Kalman para estimação das variáveis de estado
- Máxima Verossimilhança para determinar as matrizes A, B, C, D.
- Gauss -Newton como método de otimização.

Um refinamento do método de Gauss-Newton [24] foi também implementado com objetivo de melhorar o desempenho do estimador dual. Da rotina de otimização obtemos as matrizes coeficientes $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ e $D(t)$. A estimação dual de estado/parâmetros é resumida na Figura 2.4.

Para avaliar as rotinas de identificação e estimação, o método de estimação de erro de saída (OEM) [23] e [58] é implementado como mostrado na Figura 2.5. A rotina de otimização na verdade foi adicionada para melhorar o desempenho do estimador. Com isso obtemos melhores resultados, os quais vão depender da quantidade de iterações. Um assunto importante que deve ser enfatizado é que, como em qualquer método de otimização os valores iniciais são muito importantes, deve-se ter um algum critério na hora de defini-los, já que os resultados vão depender desses valores.

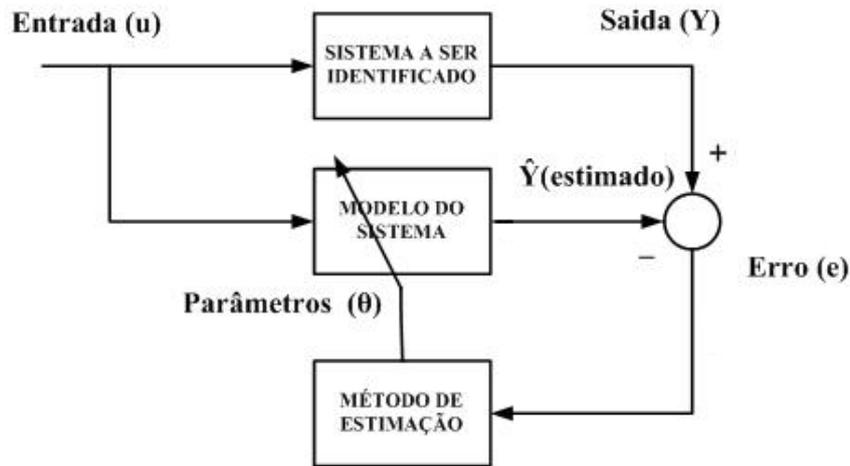


Figura 2.5: Estimação de Erro de Saída

Devemos enfatizar que adicionar uma rotina de otimização no método de estimação dual é uma das importantes contribuições desse trabalho nos métodos de identificação e estimação.

2.3.1 Estimação do erro de saída (OEM)

O objetivo do método OEM é minimizar o erro de estimação da saída, como mostrada na Fig.2.5. Tendo $y(t)$ como sinal de saída do sistema e $\hat{y}(t)$ o valor estimado, o erro de saída seria dado pela diferença das duas $erro = y(t) - \hat{y}(t)$, onde $y(t)$ e $\hat{y}(t)$ estão em função das variáveis de estado e os parâmetros do sistema.

2.3.2 Discussão

Em muitos casos, para identificar sistemas fazemos uma simplificação matemática para calcular por separado as variáveis de estado e os parâmetros dos sistema. A utilização de um estimador de variáveis de estado (e.g. Kiltro de Kalman) com um estimador de parâmetros baseado em máxima verossimilhança como parte do mesmo processo de estimação, é um grande aporte para identificar sistemas onde se conhece a equação matemática. Os valores de entrada e da saída, considerando que esse tipo de identificação é difícil e complexa.

Um aporte adicional desse trabalho é adicionar uma rotina de otimização baseada no método de Gauss-Newton como mostrado no apêndice C.

Um trabalho prévio antes de aplicar o método de estimação proposto, é linearizar

o sistema, que nosso caso é o arco elétrico, passar para a sua forma em espaço de estado, escolhendo a condutância como a variável de estado e depois colocar na sua forma de espaço de estado discreto utilizando o método “zero order hold”.

Capítulo 3

Arco Elétrico

3.1 Conceitos Básicos de Arco Elétrico

Tanto na natureza como em sistemas de potência podemos observar os mais diversos tipos de arco elétrico, tais como os chamados arcos de caráter aleatório e arcos associados a aplicações específicas:

- Arcos de Caráter aleatório são aqueles relacionados a fenômenos naturais e relacionados com alguns fenômenos que acontecem no sistema elétrico devido a uma perturbação que geram sobretensões ou perda de isolamento em algumas partes do sistema. Os mais conhecidos são as descargas atmosféricas, descargas no ar para a terra ou entre fases.
- Arcos Associados a aplicações específicas, são relacionados a manobras ou atuação de dispositivos, tais como disjuntores, centelhadores, pára-raios com centelhadores, válvulas de mercúrio, lâmpadas de descarga com gases, eletrodos de fornos elétricos, entre outros.

Nesse trabalho, os fenômenos relacionados com o arco elétrico, são classificados em:

- O arco primário gerado devido a alguma manobra de algum dispositivo
- o arco secundário que é consequência do arco primário e das manobras realizadas para extinguir o arco primário, devido à sobretensões causada pela abertura de uma das fases de uma linha e a tensão induzida sobre a fase aberta, das outras duas que ainda estão energizadas.

3.2 Arco Elétrico nos Disjuntores

A função básica de um disjuntor de potência é a abertura e fechamento de um circuito elétrico, isto é, transportando e cortando a corrente sob condições normais, considerando que trabalham com altas correntes. Em disjuntores de potência, a intensidade da corrente que flui através dos condutores e o nível de tensão que pode ser suportado pelo material isolante são muito altos [49].

O arco elétrico é o principal elemento no processo de interrupção de corrente nos disjuntores. Apesar das intensas pesquisas nas últimas décadas, ainda não se conseguiu um consenso em torno de um modelo aplicável aos vários tipos de manobra realizadas por um disjuntor e que simule exatamente o seu comportamento no instante da interrupção.

Quando os contatos são separados para interromper a corrente do circuito é gerado um arco antes da corrente ser extinta, isto é, considerar que o corte da corrente refere-se a extinguir esse arco. O interesse técnico em interrupção de circuitos é extinguir rápida e efetivamente o arco.

A formação do arco elétrico, na interrupção de uma corrente alternada, pode ser simplificada descrita como segue: nos instantes que precedem a separação galvânica dos contatos do disjuntor, a densidade de corrente aumenta rapidamente, devido a diminuição da área de passagem, o que ocasiona um rápido aumento de temperatura dos contatos. Um processo de ionização térmica na massa do gás tem início nessa região forçando a continuação da passagem da corrente entre os contatos após sua abertura, por meio de elétrons e ions liberados do meio extintor, agora sendo progressivamente ionizado.

Além da ionização térmica, tem-se também a ionização provocada pelos choques entre ions acelerados pelo campo elétrico entre os contatos e as moléculas e/ou átomos do gás ambiente.

Em condições de regime permanente, principalmente no que diz respeito à taxa de variação da corrente di/dt que deverá ser igual ou aproximadamente igual a zero, o arco é dito estacionário ou estático. E define-se como arco dinâmico ou comportamento dinâmico do arco, aquele onde a variação de corrente di/dt apresenta valores de não desprezíveis na análise em questão. O estudo do comportamento dinâmico do arco é a base para a compreensão do processo de interrupção de corrente em

disjuntores de potência, que consiste na transformação do meio extintor altamente ionizado pelas altíssimas temperaturas do arco e, portanto, condutor, em um meio isolante capaz de suportar as altas taxas de crescimento do Tensão de Restabelecimento Transitoria (TRT), no menor espaço possível, após o zero de corrente.

3.2.1 Detalhes da estrutura do arco

A separação dos contatos do gerador gera um arco elétrico, que está constituído de um vapor de metal cercado por um ambiente de gás ionizado. Em muitos casos o arco é estabelecido dentro de um espaço estreito e limitado de maneira que possa ser rapidamente resfriado pelo fluxo de fluido ou gás [48]. Na maioria dos disjuntores a gás SF_6 , o arco é gerado em um espaço cilíndrico circundado por material isolante. Os limites do arco no espaço cilíndrico são formados por uma parede isolante, o diâmetro e quantidade de fluxo de gás são limitados pelas dimensões do espaço. A interação entre o material da parede e o arco através da troca de calor não deve ser negligenciada. A dissipação da energia térmica pela vaporização do material da parede e as mudanças nas características termodinâmicas do gás dentro do arco são devidas à mistura com o material da parede são exemplos típicos desta interação. Uma descrição básica do arco no fluxo de gás SF_6 será dada nas próximas seções baseadas em [48]. Um arco localizado em um meio gasoso se estrutura através do equilíbrio da energia elétrica colocada no espaço do arco e da energia térmica dispersada no espaço circundante. A distribuição de temperatura faz com que a energia térmica flua, e este fluxo por sua vez determina a distribuição da temperatura. A transferência de energia para o ambiente é fortemente dominada pela turbulência e radiação. Os fatores mais importantes na decisão quanto, esta estrutura, são as características termodinâmicas do gás. A densidade do gás, por exemplo, é um fator que domina a energia que pode ser sustentada em um espaço limitado. Observa-se que a densidade pode ser descrita pela lei de Boyle-Charles em temperaturas inferiores a $1600K$, mas em temperaturas mais altas do que isso a densidade é menor do que o valor esperado de acordo com esta lei. Isto se explica pela dissociação da molécula se torna ativa em temperaturas superiores a $1600K$ e a absorção de energia de uma molécula como SF_6 é uma função complexa da temperatura. O comportamento macroscópico do gás pode ser descrito convenientemente através de

propriedades termodinâmicas como as propriedades de transporte e entalpia. Estas propriedades foram determinadas através de cálculos teóricos a partir de propriedades termoquímicas e do calor. Detalhes da condutividade térmica e condutividade elétrica podem ser vistas na referencia [59].

Os disjuntores por regra geral agrupam-se segundo a tecnologia empregada para extinguir o arco elétrico que se forma entre os contatos quando se inicia a operação de abertura ou termina a operação de fechamento. Em outras palavras, pode-se dizer que existe uma relação entre a tensão e o tipo de disjuntor, e também entre o avance da tecnologia do disjuntor [48]. A saber, existem vários tipos de disjuntores de potência como mostrado em [47].

3.2.2 TRT em Disjuntores

A interrupção de corrente de falta é considerada a condição de manobra mais severa a que um disjuntor pode ser submetido e quanto maior for a corrente de falta, maior será a solicitação imposta ao disjuntor.

Quando ocorre uma falta num sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso o mais rápido possível, de forma a minimizar os efeitos da falta sobre o restante do sistema.

A tensão de estabelecimento é definida como a diferença das tensões medidas entre cada lado do disjuntor e a terra.

A magnitude inicial da tensão de estabelecimento transitória é dada pela combinação das componentes de frequências naturais com a componente de industrial. Uma onda de tensão com esse valor inicial começa a propagar através das linhas de transmissão conectadas à barra, a partir do terminal do disjuntor oposto à falta e se reflete em pontos de descontinuidade retornando ao ponto de partida, onde é refletida, novamente, somando-se à onda de tensão inicial.

A partir daí o processo se repete até o amortecimento completo da onda de tensão. Portanto, a magnitude total da TRT compreende o surto inicial provocado pela abertura do disjuntor acrescido das reflexões que chegam ao ponto onde o surto teve início.

3.2.3 A influência de di/dt na capacidade de interrupção do arco

Se conhece o fato da sensibilidade dos disjuntores (variável com o meio extintor) à derivada da corrente na passagem por zero. A intensidade da condutância residual g_0 é diretamente proporcional ao valor de di/dt no instante $t = 0$; evidentemente, quanto maior a corrente pós-arco e, portanto, maior a dificuldade que o disjuntor terá em interromper definitivamente a corrente original. Um aumento de di/dt proveniente de um aumento da frequência terá, dentro de certos limites, o mesmo efeito de um aumento de di/dt proveniente de um aumento da intensidade de corrente no que diz respeito a condutância residual.

3.3 Arco secundário

A falta mais freqüente em linhas de transmissão de alta tensão são as faltas causadas por arco de uma fase a terra, chamada também de flash over. Em linhas de HV/EHV, o autoreligamento de uma fase é um médio efetivo para clarear o defeito para manter a estabilidade do sistema. Quando uma falta a terra é isolada pela abertura de um pólo, o arco muda seu estado de uma corrente de falta muito alta a um estado estável com uma corrente de arco baixa (“arco secundário”), o qual termina normalmente pela extinção do arco. Durante o tempo morto ainda é transferida a energia elétrica ao arco através do acoplamento capacitivo das outras fases que ainda estão energizadas [4].

3.3.1 Extinção do arco secundário

Quando uma fase de uma linha de três fases é aberta em ambos os lados, a fase em falta é acoplada, às outras duas fases, que ainda estão energizadas, como mostrada na Fig. 3.1. Uma tensão é induzida na fase isolada pela existência do acoplamento capacitivo e em menor extensão devido ao acoplamento indutivo. A magnitude da tensão induzida está em função direta das capacitâncias fase-fase e fase-terra. A tensão induzida pode sustentar o arco da falta por um período prolongado depois da abertura da fase. O arco do condutor da fase em falta após este ter sido desligado

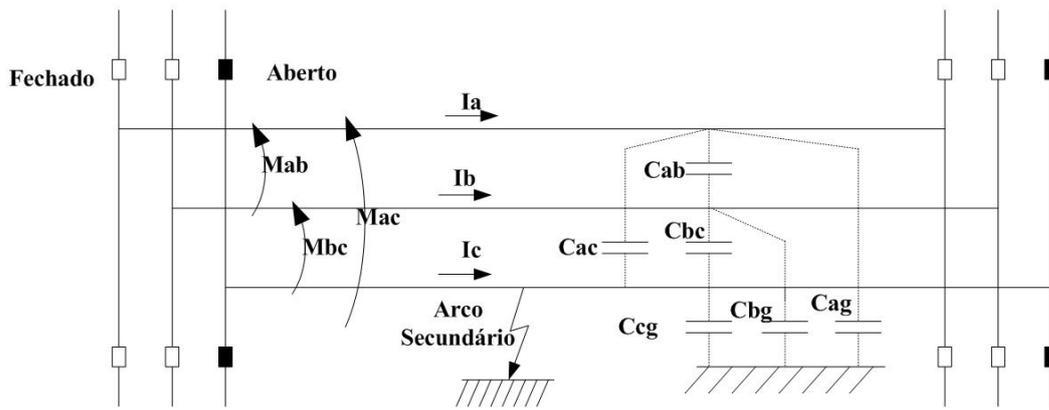


Figura 3.1: Representação do Arco secundário

é denominado o arco secundário. A corrente do arco secundário é normalmente determinada pela tensão do circuito e pelo comprimento da seção da linha que é desligada. Ela é também influenciada pela localização do defeito, por quaisquer reatores em paralelo conectados diretamente à fase aberta, e pela transposição da linha.

Para a redução da corrente de arco secundário é comumente empregado reatores de neutro no caso de linhas de transmissão com compensação em derivação. O esquema do reator com quatro pernas tem sido usado em grande número de aplicações para desligamento de um pólo para redução da corrente do arco secundário. Outro método de supressão de arco secundário consiste na utilização de disjuntores para aterramento de alta velocidade. Este método é atraente para linhas sem reatores em paralelo.

As figuras 3.2, 3.3 e 3.4 mostram fotos de casos reais de arco secundário.



Figura 3.2: Foto de um Arco Secundário Real



Figura 3.3: Arco Secundário iniciado por uma ponte no espaço aéreo



Figura 3.4: Arco Secundário iniciado curto circuitando o isolador de Linha

3.4 Representação dos Modelos de Arco Elétrico em Espaço de Estado

A escolha das variáveis de estado é um passo muito importante na representação de sistemas. No caso do arco elétrico a condutância é escolhida como variável de estado porque de acordo com as equações diferenciais dos modelos de arco é o mais adequado e as entradas e saídas dependem de cada modelo de arco, mas estão em função das correntes e tensões do arco.

Nos casos onde o modelo está constituído por dois ou mais sub arcos, demandando uma manipulação algébrica, teríamos um vetor de condutâncias de cada sub arco. Em alguns casos, onde um simples rearranjo matemático não é viável, faz-se necessário a linearização do modelo em torno de um ponto de operação de maneira a ter um modelo no espaço de estado e posterior discretização utilizando o método “zero order hold”.

Os detalhes, desde a manipulação algébrica até a discretização do modelo em espaço de estado discreto são descritos nesse documento. Para a aplicação no arco elétrico são mostrados nas seguintes seções.

3.4.1 Modelo de Arco de Cassie

A equação do modelo de Cassie como usualmente conhecida:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = -\frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (3.1)$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ_c é a constante de tempo do sistema e U_c é a constante de tensão de arco. Após uma manipulação matemática temos

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= \left[-\frac{1}{\tau_c} \right] g + \left[\frac{1}{\tau_c} \frac{1}{U_c^2} \right] u \cdot i \\ i &= u \cdot g \end{aligned} \quad (3.2)$$

A expressão em espaço de estado é dado por

$$\begin{aligned} \dot{g}(t) &= A_c g(t) + B_c u_c(t) \\ i(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde, $A_c = -\frac{1}{\tau_c}$; $B_c = \frac{1}{\tau_c} \frac{1}{U_C^2}$; $C = u$ e $u_c = i^2$, sendo g a variável de estado, i^2 , i a saída.

Discretizando a equação pelo método de “zero order hold” temos

$$\begin{aligned} g_{k+1} &= A_d g_k + B_d u_k \\ y_k &= C g_k \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde, $A_d = \exp(A)$; $B_d = B * (\exp(A) - 1) / A$; e C é o mesmo do caso contínuo. Este seria o modelo na sua forma de espaço de estado discreto para modelo de Cassie.

3.4.2 Modelo de Arco de Mayr

A equação do modelo de Mayr como usualmente conhecida :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right] \quad (3.5)$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ_m é a constante de tempo do sistema e P_0 é a potência de resfriamento do arco, que era independente da temperatura ou da corrente. Fazendo um rearranjo matemático:

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= \frac{1}{\tau_m} g + \frac{1}{\tau_m} \frac{1}{P_0} i^2 \\ i &= u g \end{aligned} \quad (3.6)$$

onde g , i^2 , i são os mesmos do item anterior. Em espaço de estado temos

$$\begin{aligned} \dot{g}(t) &= -\frac{1}{\tau_m} g(t) + \frac{1}{\tau_m} \frac{1}{P_0} u_c(t) \\ i(t) &= C g(t) \end{aligned} \quad (3.7)$$

onde, $C = u$ e a entrada do sistema $u_c = i^2$. Utilizando o método “zero order hold” obtemos a sua forma de espaço de estado discreto.

3.4.3 Modelo de Arco de Habedank

O modelo de arco de Habedank [8] é uma conexão em serie de dois arcos, um modelado utilizando o modelo de arco de Cassie com uma constante de tempo τ_m

outro utilizando o modelo de arco de Mayr com uma constante de tempo τ_c . Assim o modelo de Habedank pode ser definido como um modelo de quatro parâmetros, as duas constante de tempo, a potência de resfriamento do arco P_0 e a constante da tensão de arco U_c do modelo de Cassie. As equações diferenciais utilizados para definir o modelo de Habedank são mostradas abaixo.

$$\begin{aligned}\frac{dg_c}{dt} &= \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{U_c^2 \cdot g_c} - g_c \right) \\ \frac{dg_m}{dt} &= \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m \right)\end{aligned}\quad (3.8)$$

onde g_c é a condutância do modelo de Cassie e g_m condutância do modelo de Mayr. Como os arcos são conectados em série, a condutância total é dada por

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m} \quad (3.9)$$

Fazendo uma manipulação algébrica obtemos a equação do arco na sua forma de espaço de estado

$$\begin{aligned}\frac{dg_c}{dt} &= \frac{1}{\tau_c} g_c + \frac{1}{\tau_c} \frac{1}{U_c^2} u i \\ \frac{dg_m}{dt} &= \frac{1}{\tau_m} g_m + \frac{1}{\tau_m} \frac{1}{P_0} i^2\end{aligned}\quad (3.10)$$

Nesse caso temos duas variáveis de estado g_c e g_m . Para obter a sua forma de espaço de estado discreto seguimos os mesmo passos que para o modelo de Cassie.

3.4.4 Modelo de Arco de Schavemaker

Um modelo de arco de Mayr modificado com uma constante de tempo e uma potência de resfriamento em função da potência elétrica da entrada. O parâmetro pode ser utilizado para ter uma tensão de arco para intervalos de correntes altas; entretanto, pode ser feito igual a zero para rejeitar este efeito [7].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u i}{\max(U_{arco} |i|, P_0 + P_1 u i)} - 1 \right) \quad (3.11)$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ é a constante de tempo do sistema e P_0 é a constante resfriamento do arco, constante de tensão de arco U_{arco} na área de corrente alta e P_1 a constante de resfriamento ajustado a zero após o a corrente passar por zero.

O modelo de Schavemaker é um modelo mais complexo e uma manipulação algébrica direta não é possível, é necessário fazer uma linearização em torno de um ponto de operação e depois discretizá-lo seguindo os mesmos passos que para o caso de Cassie.

3.4.5 Modelo de Arco de Schwarz

É um modelo modificado de Mayr cuja “constante de tempo” e a potência de resfriamento são dependentes da condutância do arco.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d}{dt}(\ln g) = \frac{1}{\tau_m g^\alpha} \left[\frac{u \cdot i}{P_o_m g^\beta} - 1 \right] \quad (3.12)$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ_m é a constante de tempo do sistema e P_o_m é a potência de resfriamento do arco, α é o parâmetro que influencia a dependência de τ com a condutância, β é o parâmetro que influencia a dependência de P com a condutância.

Das equações (3.8) e (3.9), fazendo uma simplificação matemática, temos na forma de espaço de estado:

$$\begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= -\frac{1}{\tau_m(g)}g + \frac{1}{\tau_m(g)} \frac{1}{P_0(g)} i^2 \\ i &= u \cdot g \end{aligned} \quad (3.13)$$

onde i é a corrente de arco, u é tensão de arco e g a condutância. Para obter a sua forma de espaço de estado discreto seguimos os mesmo passos que para o caso de Mayr.

3.4.6 Modelo Modificado de Thiel

Considerando que o modelo de Thiel é um modelo com dois sub arcos cada um representado pelo modelo de Mayr [1],

$$\begin{aligned} \frac{dg_1}{dt} &= \frac{g_1}{\tau_1} \left(\frac{u_1 \cdot i_1}{P_{o_1}} - 1 \right) \\ \frac{dg_2}{dt} &= \frac{g_2}{\tau_2} \left(\frac{u_2 \cdot i_2}{P_{o_2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3.14)$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ_m é a constante de tempo do sistema e P_{o_m} é a potência de resfriamento do arco.

Rearranjo matemático:

$$\begin{aligned}\frac{dg_1}{dt} &= \frac{g_1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_1} \frac{i^2}{P_{01}} \\ \frac{dg_2}{dt} &= \frac{g_2}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_2} \frac{i^2}{P_{02}}\end{aligned}\tag{3.15}$$

A sua forma em espaço de estado é dado por

$$\begin{aligned}\dot{g}_1(t) &= -\frac{1}{\tau_1}g_1(t) + \frac{1}{\tau_1} \frac{1}{P_{01}} \cdot u_c(t) \\ \dot{g}_2(t) &= -\frac{1}{\tau_2}g_2(t) + \frac{1}{\tau_2} \frac{1}{P_{02}} \cdot u_c(t)\end{aligned}\tag{3.16}$$

onde, a entrada do sistema $u_c = i^2$.

3.4.7 Variante do Modelo Modificado de Thiel

Para o caso onde se considere que o modelo de Thiel é um modelo modificado de Mayr em que a “constante de tempo” e potência de resfriamento dependem da condutância do arco [1],

$$\begin{aligned}\frac{g_{m1}}{dt} &= \frac{1}{\tau_{m1}g_{m1}^a} \left(\frac{u^2g_{m1}^2}{P_{o_{m1}}g_{m1}^b} - g_{m1} \right) \\ \frac{dg_{m2}}{dt} &= \frac{1}{\tau_{m2}g_{m2}^a} \left(\frac{u^2g_{m2}^2}{P_{o_{m2}}g_{m2}^b} - g_{m2} \right)\end{aligned}\tag{3.17}$$

onde g é a condutância do arco, em siemens, u a tensão do arco, em volts, i a corrente do arco, em amperes, τ_m é a constante de tempo do sistema e P_{o_m} é a potência de resfriamento do arco, α é o parâmetro que influencia a dependência de τ com a condutância, β é o parâmetro que influencia a dependência de P com a condutância.

Para chegar na sua forma de espaço discreto é so seguir os mesmos passos que para o modelo de Mayr.

3.4.8 Modelo de arco de KEMA

O modelo de KEMA [7] é representado por três arcos em série, cada um deles é um modelo modificado de Mayr.

$$\begin{aligned}\frac{dg_1}{dt} &= \frac{A_1}{\tau_1} \cdot g_1^{\lambda_1} \cdot u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} g_1 \\ \frac{dg_2}{dt} &= \frac{A_2}{\tau_2} \cdot g_2^{\lambda_2} \cdot u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} g_2 \\ \frac{dg_3}{dt} &= \frac{A_3}{\tau_3} \cdot g_3^{\lambda_3} \cdot u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} g_3\end{aligned}\tag{3.18}$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3}\tag{3.19}$$

$$u = u_1 + u_2 + u_3\tag{3.20}$$

onde: $\lambda_1 = 1,4375$, $\lambda_2 = 1,9$, $\lambda_3 = 2$, $\tau_2 = \frac{\tau_1}{k_1}$, $\tau_3 = \frac{\tau_2}{k_2}$, e $A_2 = \frac{A_3}{k_3}$

$$i = gu = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} u\tag{3.21}$$

onde, g é a condutância total do arco, g_n é a condutância do arco n , u é a tensão total do arco, u_n é a tensão do arco n , i é a corrente através do arco, τ_n constante de tempo do arco n , A_n constante (resfriamento) do arco n , λ_n o controle de Cassie-Mayr do arco n ; $\lambda_n = 1$ resulta num arco de Cassie, $\lambda_n = 2$ resulta num arco de Mayr, k_n parâmetros livres [7].

O modelo de KEMA também é um modelo mais complexo e uma manipulação algébrica direta não é possível, é necessário fazer uma linearização em torno de um ponto de operação e depois discretiza-lo seguindo os mesmos passos que para o caso de Cassie.

3.4.9 Modelo de Mayr-Portela

Este modelo proposto por Portela et al. [2], é uma generalização do modelo de Thiel modificado que inclui um termo adicional de ajuste, sendo indicado para as situações em que trocas de calor significativas ocorram entre regiões com constantes de tempo

diferentes fazendo com que os modelos parcelas não possam ser consideradas como completamente independentes.

As expressões que regem o modelo são as seguintes:

$$\begin{aligned}\frac{dg_1}{dt} &= \frac{g_1}{\tau_1} \left[\frac{u_1 \cdot i_a}{P_{01}} - 1 + \frac{\eta\phi}{\xi} \right] \\ \frac{dg_2}{dt} &= \frac{g_2}{\tau_2} \left[\frac{u_2 \cdot i_a}{P_{02}} - 1 - \frac{\eta\phi}{1-\xi} \right]\end{aligned}\quad (3.22)$$

onde, $P_{resf} = P_0 = P_{01} + P_{02}$; $P_{01} = \xi \cdot P_0$; $P_{02} = (1 - \xi) \cdot P_0$; $\phi = \frac{J}{P_{arf}} = \frac{J}{P_0} = \text{constante}$; $\eta = \ln[\varepsilon - \frac{g_2}{g_1}]$ e $\varepsilon = \frac{1-\xi}{\xi}$. O modelo introduz uma relação entre g_1 e g_2 em cada modelo parcela e um novo parâmetro adimensional e constante $\phi = \frac{J}{P_0}$. Quando este parâmetro é zero, recai-se no modelo de Thiel modificado. A Tabela 3.1 mostra o resumo de todos os modelos de arco mencionados no final desse Capítulo. Através de um rearranjo matemático obtemos:

$$\begin{aligned}\frac{dg_1}{dt} &= \left[-\frac{1}{\tau_1} + K_{p1} \right] \cdot g_1 + \left[\frac{1}{\tau_1} \frac{1}{P_{01}} \right] \cdot i^2 \\ \frac{dg_2}{dt} &= \left[-\frac{1}{\tau_2} - K_{p2} \right] \cdot g_2 + \left[\frac{1}{\tau_2} \frac{1}{P_{02}} \right] \cdot i^2\end{aligned}\quad (3.23)$$

A sua forma em espaço de estado é dado por

$$\begin{aligned}\dot{g}_1(t) &= \left[-\frac{1}{\tau_1} + K_{p1} \right] \cdot g_1(t) + \left[\frac{1}{\tau_1} \frac{1}{P_{01}} \right] \cdot u_c(t) \\ \dot{g}_2(t) &= \left[-\frac{1}{\tau_2} - K_{p2} \right] \cdot g_2(t) + \left[\frac{1}{\tau_2} \frac{1}{P_{02}} \right] \cdot u_c(t)\end{aligned}\quad (3.24)$$

onde, $u_c = i^2$ é a entrada do sistema; K_{p1} e K_{p2} são as constantes de Portela.

Para chegar na sua forma de espaço discreto é so seguir os mesmos passos que para o modelo de Thiel Modificado.

3.5 Métodos existentes de identificação dos Parâmetros do Arco

Pode se dizer que o ponto central do problema de modelagem do arco é a determinação dos seus parâmetros ou funções características, dadas as dificuldades e a onerosidade dos métodos disponíveis. Dos vários métodos existentes para a determinação das funções características do arco, serão citadas as mais conhecidas na literatura.

3.5.1 Método de Amsink a partir de um ensaio

Este método [47], é baseado em uma interrupção sem sucesso (abertura com reignição térmica).

3.5.2 Método de Rijanto-Circuito especial de injeção de corrente

O método proposto por Rijanto [47], em 1974, baseia-se nas seguintes considerações, a partir da equação de Schwarz (ver apêndice E).

3.5.3 Método de Ruppe-A partir de vários ensaios de abertura

É um método bastante engenhoso, desenvolvido por Ruppe e ampliado pelos engenheiros do Instituto Tecnológico de Ilmenau, na ex-República Democrática Alemã. Guarda uma semelhança com o método de Amsink, prescindindo, porém da reignição do disjuntor, o que é uma sensível vantagem, pois não há necessidade de se ter circuitos de injeção de corrente (sintéticos), nem se sobrecarrega o disjuntor em ensaios com reignições [47].

3.5.4 Método Asturiano ou Próprio

É um novo método que só precisa de um único ensaio no interruptor para determinar os parâmetros da equação do modelo escolhido. Este ensaio pode ser tanto uma

reignição do arco ou uma abertura sem reignição. É um método que pode ser aplicado em maior número de casos que os métodos anteriores [50].

3.5.5 Considerações adicionais sobre a determinação dos Parâmetros do Arco

De todo o estudo de modelagem matemática do arco elétrico, a determinação dos parâmetros ou funções características $P_0(g)$ e $\theta(g)$ é uma das áreas mais controversas, dadas as dificuldades encontradas em termos de dispersão dos valores obtidos, dispersão esta causada, por um lado, pelo comportamento estatístico do arco, e por outro, pela imprecisão nas medidas feitas a partir de oscilogramas $u(t)$ e $i(t)$ dos ensaios reais.

3.5.6 A modelagem do Arco para pequenas correntes

A interrupção de pequenas correntes, principalmente as indutivas, sempre se revestiu de grande importância, sobretudo devido ao fenômeno de corte de corrente (chopping), que pode ocasionar sobretensões indesejáveis.

Devido a isto, o problema da instabilidade do arco, como fase preliminar ao corte de corrente e praticamente causadora deste, foi, desde o início, incluído nas pesquisas de modelagem de arco [1].

3.5.7 Discussão

O comportamento do arco elétrico em diferentes situações, de falta, dentro de equipamentos de manobra e por acoplamento das fases energizadas (arco secundário), dependem de muitos fatores. Existem vários modelos matemáticos em função da condutância e de alguns parâmetros, alguns com mais de uma constante de tempo que tentam reproduzir esse comportamento.

A estimação dos parâmetros desses modelos matemáticos é outro desafio. A ideia de colocar as equações diferenciais do arco elétrico na sua forma de espaço de estado é uma das contribuições dessa tese, já que facilita a estimação dos parâmetros do arco. Com isso podemos aplicar o método de estimação proposto.

Tabela 3.1: Resumo dos Modelos de Arco Elétrico

MODELO	EQUAÇÃO DO MODELO	PARÂMETROS
Cassie	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{U_C^2} - 1 \right)$	$\tau_c, U_C = \text{constante}$
Mayr	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left[\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right]$	$\tau_m, P_0 = \text{constante}$
Habedank	$\frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{U_c^2 \cdot g_c} - g_c \right)$	$\tau_c, \tau_m, U_C, P_0 = \text{constante}$
Schavemaker	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{ui}{\max(U_{arco} i , P_0 + P_1 ui)} - 1 \right)$	$\tau_c, U_{arco}, P_0, P_1 = \text{constante}$
Schwarz	$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau g^a} \left[\frac{u \cdot i}{P g^b} - 1 \right]$	$\tau, P, a, b = \text{constante}$
Modificado de Thiel	$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_1 \right)$ $\frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{\tau_2} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_2 \right)$	$\tau_1 = A_1 \cdot g^\alpha; \tau_2 = A_2 \cdot g^\alpha; P_0 = B \cdot g^\beta;$ A_2 e α constantes; B e β variáveis
KEMA	$\frac{dg_1}{dt} = \frac{A_1}{\tau_1} g_1^{\lambda_1} u_1^2 - \frac{1}{\tau_1} g_1$ $\frac{dg_2}{dt} = \frac{A_2}{\tau_2} g_2^{\lambda_2} u_2^2 - \frac{1}{\tau_2} g_2$ $\frac{dg_3}{dt} = \frac{A_3}{\tau_3} g_3^{\lambda_3} u_3^2 - \frac{1}{\tau_3} g_3$	A_1, A_2 e A_3 constante τ_1, τ_2 e τ_3 constante λ_1, λ_2 e λ_3 constante
Mayr-Portela	$\frac{dg_1}{dt} = \frac{g_1}{\tau_1} \left[\frac{u_1 \cdot i_a}{P_{01}} - 1 + \frac{\eta \cdot \phi}{\xi} \right]$ $\frac{dg_2}{dt} = \frac{g_2}{\tau_2} \left[\frac{u_2 \cdot i_a}{P_{02}} - 1 - \frac{\eta \cdot \phi}{1 - \xi} \right]$ $\eta = \ln \left[\varepsilon - \frac{g_2}{g_1} \right]$	τ_1 e τ_2 constante $\phi = \frac{J}{P_{resf}} = \frac{J}{P_0} = \text{constante}$ $P_{01} = \xi \cdot P_0; P_{02} = (1 - \xi) \cdot P_0$ $\varepsilon = \frac{1 - \xi}{\xi}$

Capítulo 4

Identificação do Arco Elétrico

Esse capítulo é dividido em dois blocos principais. No primeiro, calculam-se os parâmetros do arco elétrico utilizando simulações no domínio do tempo considerando vários modelos de arco. Para vários modelos de arco, ruído branco são adicionados aos sinais para verificar o desempenho do estimador. No segundo bloco, uma montagem experimental realizada no Laboratório de Corona foi utilizada para gerar o arco elétrico no ar. Os parâmetros do arco foram identificados utilizando a metodologia acima descrita, a partir dos dados de medição de tensão e corrente obtidos no experimento.

O procedimento de estimação e verificação foi implementado no MATLAB.

4.1 Identificação do Arco Elétrico para Casos Simulados

Foram consideradas diferentes configurações de rede elétrica implementadas em MATLAB e PSCAD. Os dados obtidos nas simulações i.e, tensões e correntes nos terminais do disjuntor ou nos terminais do arco são utilizados para estimar os parâmetros do arco. Os casos simulados são importantes pois nessas configurações o modelo do arco é, de fato, conhecido sendo possível determinar o erro na estimação e na identificação do arco.

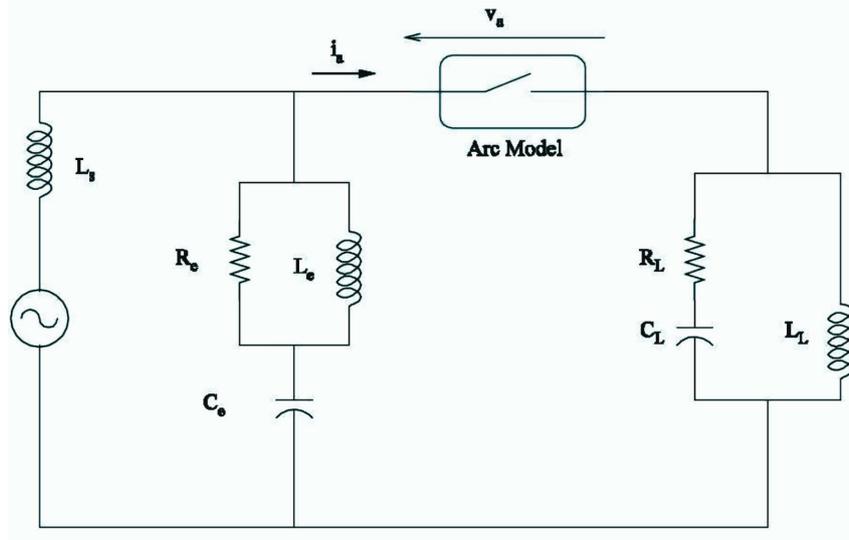


Figura 4.1: Circuito implementado para representar o Arco num disjuntor

4.1.1 Arco Elétrico no Disjuntor

Para representar arco elétrico no disjuntor, foi implementado um circuito monofásico, como mostrado na Fig. 4.1, onde i_a e v_a são respectivamente a corrente total e a tensão de arco. O arco é representando como um interruptor com uma condutância controlável, mas pode ser modelado também como uma resistência variante no tempo. Os dados do sistema simulado são mostrados na Tabela (4.1). O circuito elétrico foi implementado em Simulink/MATLAB. Para esse circuito foram considerados os modelos de arco de Mayr e Schwarz.

4.1.1.1 Para o modelo de Arco de Mayr

O modelo de arco de Mayr é representado na sua forma de espaço de estado, conforme (4.1). As tensões e correntes, obtidas na simulação, que representam os dados de entrada e saída do estimador podem ser vistas nas Fig. 4.2 e 4.3.

A Fig. 4.4 mostra a condutância do arco para o modelo de Mayr. E os parâmetros do modelo de arco de Mayr são mostrados na Tabela 5.2.

A sua forma em espaço de estado discreto é dado por

$$\begin{aligned} g_{k+1} &= A_d g_k + B_d u_k \\ y_k &= C \cdot g_k \end{aligned} \tag{4.1}$$

Tabela 4.1: Dados do Circuito do Disjuntor

Parâmetros do Circuito	Valor
$L_s(H)$	3.52×10^{-3}
$R_e(\Omega)$	29.8
$L_e(H)$	5.28×10^{-3}
$C_e(F)$	1.98×10^{-6}
$R_L(\Omega)$	450
$L_L(\Omega)$	6.256×10^{-4}
$C_L(F)$	6.256×10^{-4}

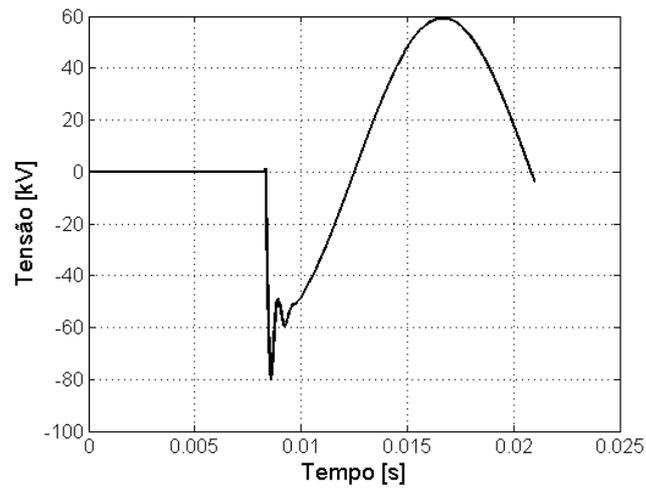


Figura 4.2: Tensão do Arco para o modelo de Mayr

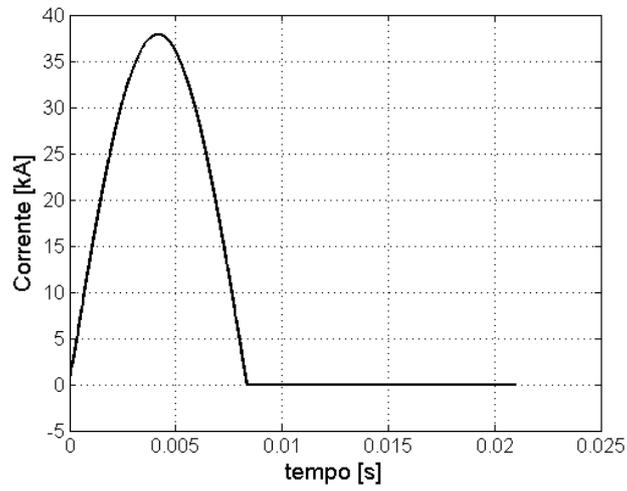


Figura 4.3: Corrente do Arco para o modelo de Mayr

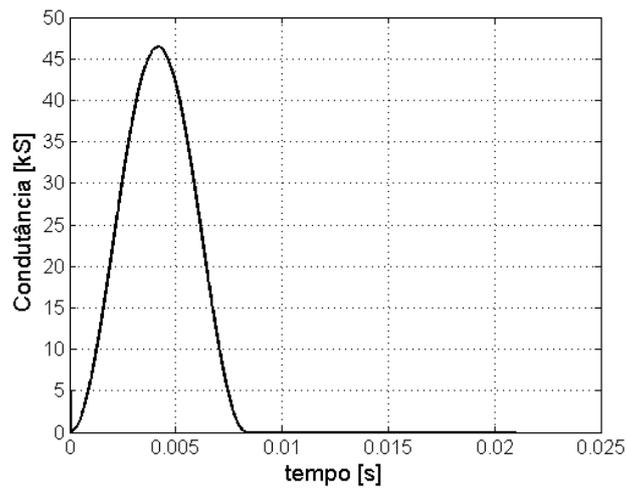


Figura 4.4: condutância do Arco para o modelo de Mayr

Tabela 4.2: Parâmetros de Arco no Disjuntor modelo de Mayr

modelo de arco	$\tau_m(\mu s)$	$P_0(kW)$
Mayr	0.3	30.9

A partir da equação (4.1), utilizamos o método proposto de estimação para determinar as matrizes A_d , B_d .

Fazemos o proceso inverso, pasamos da sua forma dicreta a continua e obtemos a forma de espaço de estado continuo, e determinamos as matrizes A_c , B_c , lembrando que

$$\begin{aligned}
 A_c &= -\frac{1}{\tau_c} \\
 B_c &= \frac{1}{\tau_c} \frac{1}{U_C^2} \\
 C &= u
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

determinamos os valores dos parâmetros do arco.

Os parâmetros de simulação implementados em simulink de MATLAB para o caso de Mayr são mostrados na tabela 4.2.

4.1.1.2 Para o modelo de Arco de Schwarz

O modelo de Schwarz é uma variação do modelo de Mayr, onde as “ constantes de tempo” e a potência variam em função da condutância, o que torna necessário mais um passo para o cálculo dos parâmetros do arco.

As Fig. 4.5 e 4.6 mostram as tensões e correntes obtidas na simulação, que para o nosso caso seriam os dados de entrada e saída do estimador.

Os parâmetros de simulação do modelo de arco de Schwarz são mostrados na Tabela 4.3.

Das equações (3.13), seguindo os mesmo passos do caso anterior (Mayr), os parâmetros do modelo de Schwarz podem ser determinados, lembrando que, neste modelo, os dois parâmetros, tanto a “constante de tempo”(τ) quanto a potência de resfriamento (P_0), são dependentes da condutância. Sendo assim, os parâmetros que o estimador dual calcula são $\tau_m(g)$ e $P_0(g)$. Para chegar aos parâmetros A , α , e β , devemos utilizar as igualdades $\tau_1 = A_1 \cdot g^\alpha$ e $\tau_2 = A_2 \cdot g^\alpha$, e aplicando logaritmo

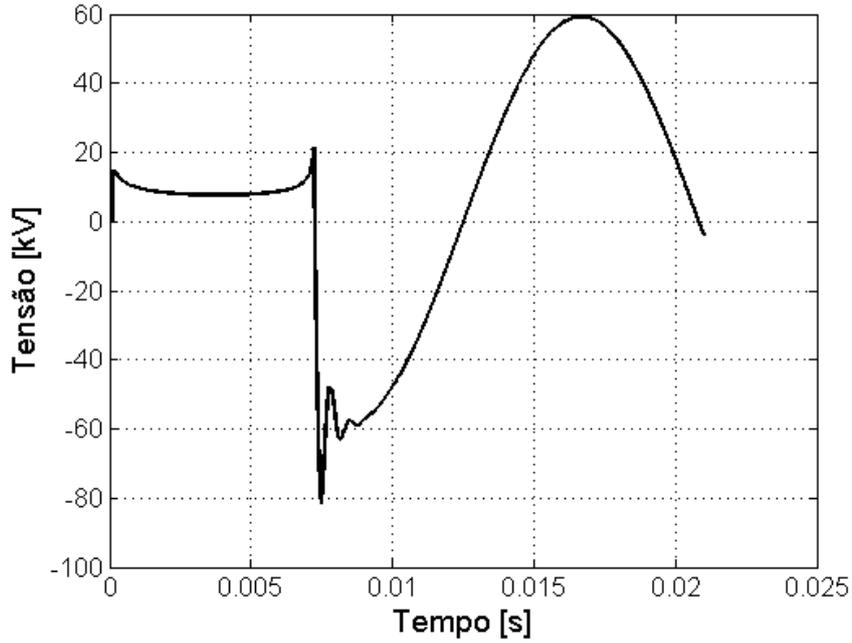


Figura 4.5: Tensão do Arco para o modelo de Schwarz

Tabela 4.3: Parâmetros de Arco no Disjuntor- modelo de Schwarz

modelo de arco	$A(\mu s)$	α	B(MW)	β
Schwarz	6.0	0.15	100	0.6

natural

$$\log(\tau) = \log(A) + \alpha \log(g) \quad (4.3)$$

também

$$\log(Po) = \log(B) + \beta \log(g) \quad (4.4)$$

Aplicando o método de estimação por mínimos quadrados, finalmente calculamos os parâmetros do arco.

A Fig. 4.7 mostra a condutância do arco para o modelo de Schwarz.

Todos os resultados da estimação para o caso de arco dentro de um disjuntor são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5. Os erros em todos os valores estimados estão dentro de margens razoáveis. As Fig. 4.8 e Fig. 4.8 mostram a corrente simulada e a saída do estimador no modelo de arco de Mayr e Schwarz. Observando a parte do ruído branco, os valores estimados descrevem, com razoável precisão, o comportamento do arco.

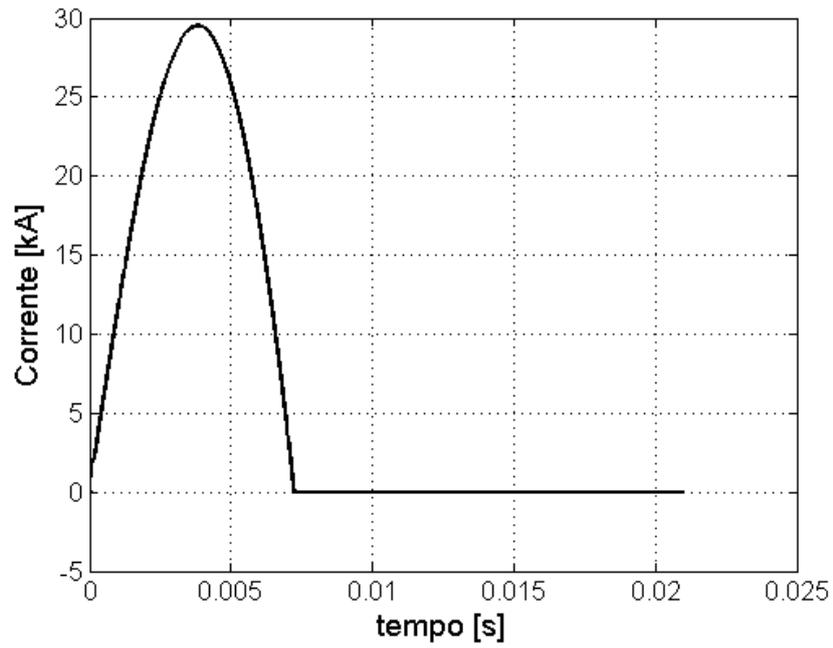


Figura 4.6: Corrente do Arco para o modelo de Schwarz

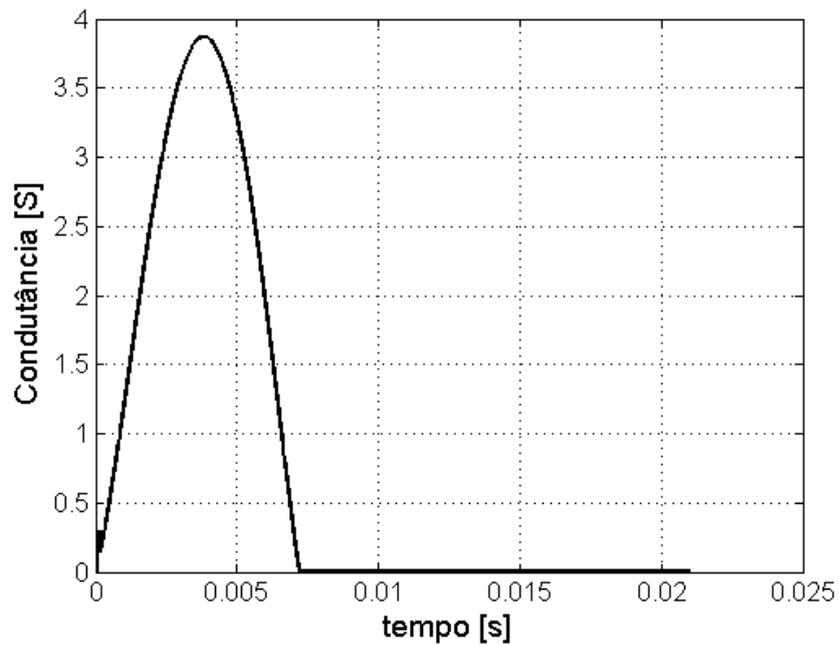


Figura 4.7: condutância do Arco para o modelo de Schwarz

Tabela 4.4: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Mayr

modelo de arco	$\tau_m(\mu s)$	$P_0(kW)$
Mayr	0.293	30.680

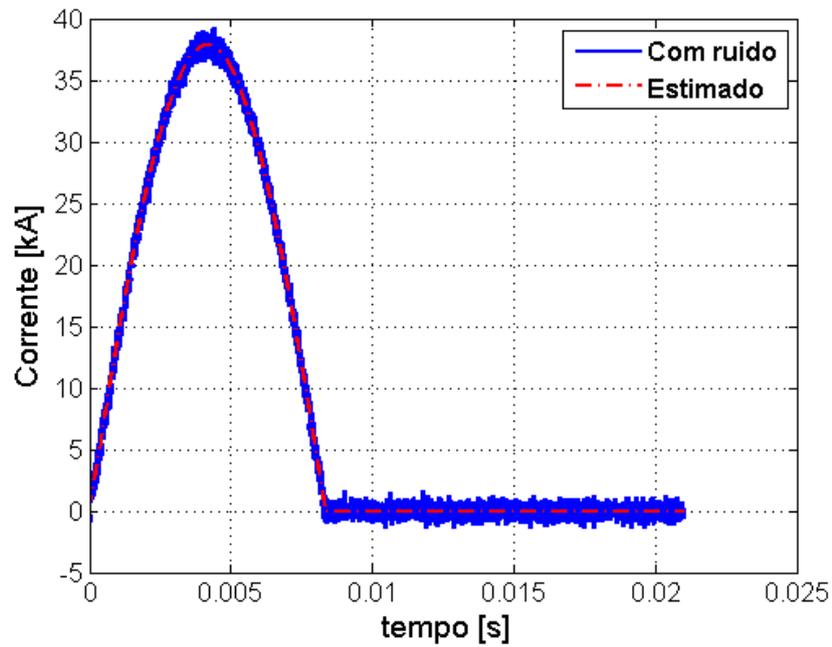


Figura 4.8: Resultados da Simulação da Corrente de Arco para o modelo de Mayr

Tabela 4.5: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Schwarz

modelo de arco	$A(A/\mu s)$	α	B(MW)	β
Schwarz	5.785	0.134	97.53	0.545

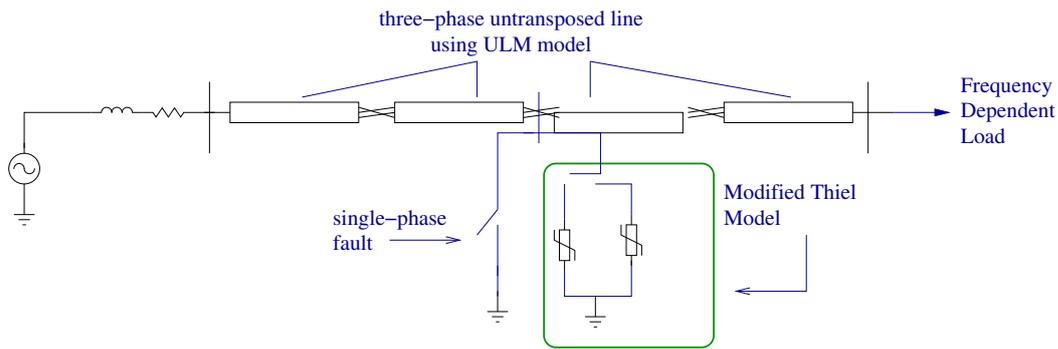


Figura 4.9: Circuito Implementado para Representar o Arco Secundário

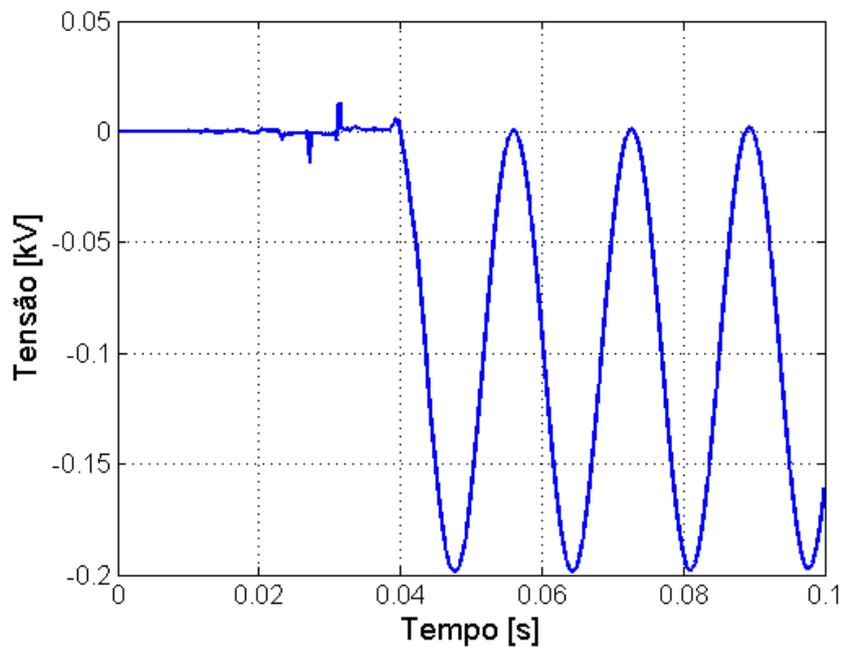


Figura 4.10: Tensão do Arco Mayr-Portela

4.1.2 Arco Secundário

Foi implementado um circuito no PSCAD/EMTDC, utilizando o modelo de Mayr-Portela, onde o arco elétrico é representado por dois sub-arcos em paralelo com duas “constantes de tempo” que são dependentes da condutância, assim como a potência de resfriamento.

A Fig. 4.9 mostra um diagrama unifilar do sistema, onde é representado um sistema equivalente de 500 kV, no qual as linhas de transmissão foram simuladas como linhas trifásicas transpostas utilizando um esquema de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6, e a carga é uma rede dependente da frequência que entrega potência nominal de linha a 60 Hz.

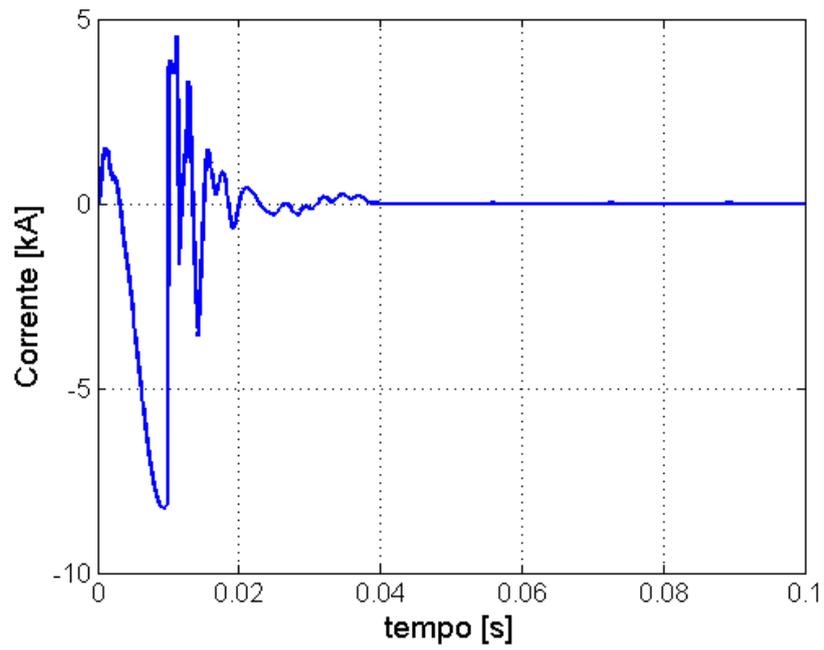


Figura 4.11: Corrente Total do Arco Mayr-Portela

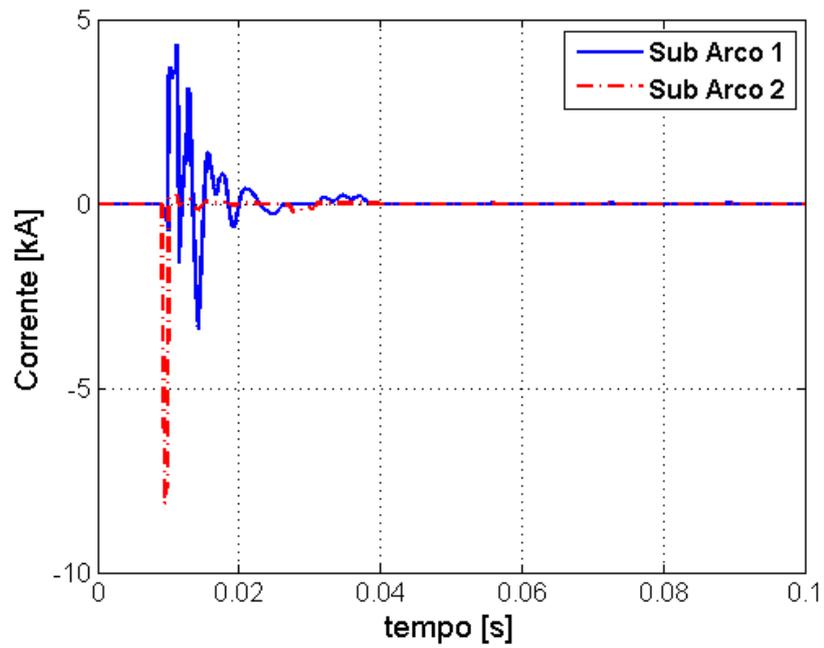


Figura 4.12: Corrente dos Sub-arcos do Arco Mayr-Portela

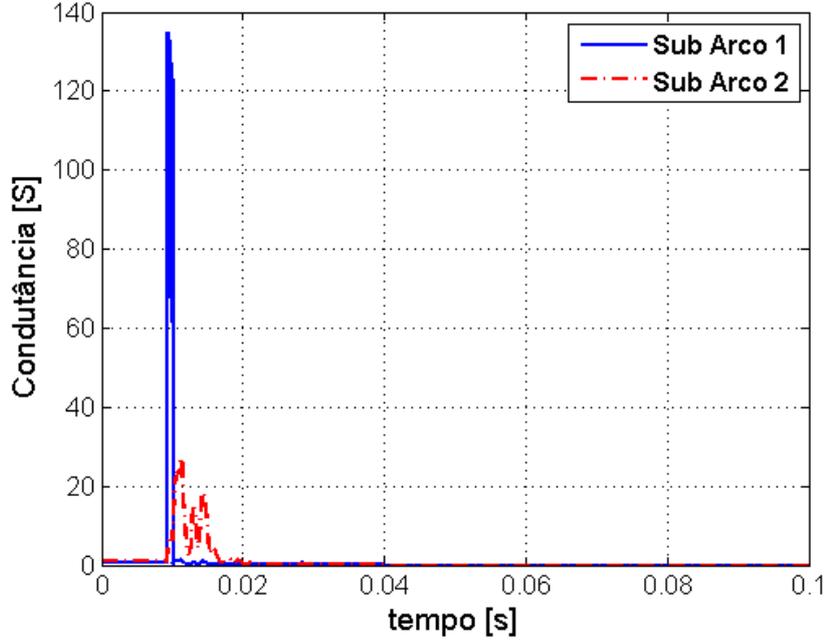


Figura 4.13: Condutância dos Sub-arcos do Arco Mayr-Portela

Tabela 4.6: Parâmetros do Arco no Ar

modelo de arco	$A_1(A/\mu s)$	$A_2(A/\mu s)$	α	$B(GW)$	β
Mayr-Portela	3.92	76.56	0.1	0.41	0.2

Nas Fig. (4.10) - (4.12) podemos observar a tensão e corrente para esse modelo de arco, com cinco parâmetros.

Para a identificação do modelo de Mayr-Portela, os parâmetros B e β e as “constantes de tempo” τ_1 e τ_2 , são mostrados na Tabela 5.4. Todos os valores são estimados utilizando o método de estimação dual, sabendo: $\tau_1 = A_1.g^\alpha$ e $\tau_2 = A_2.g^\alpha$, tomando logaritmo temos

$$\log(\tau) = \log(A.g^\alpha) \Rightarrow \log(\tau) = \log(A) + \alpha \log(g) \quad (4.5)$$

$$\log(\tau) = \log(A) + \alpha \log(g)$$

também

$$P_o = B.g^\beta \Rightarrow \log(P_o) = \log(B) + \beta \cdot \log(g) \quad (4.6)$$

$$\log(P_o) = \log(B) + \beta \cdot \log(g)$$

Das equações (4.5) e (4.6), podemos extrair os valores de α , β , A , e B , respectivamente. Como podemos ver, para calcular estes valores, foi preciso implementar um

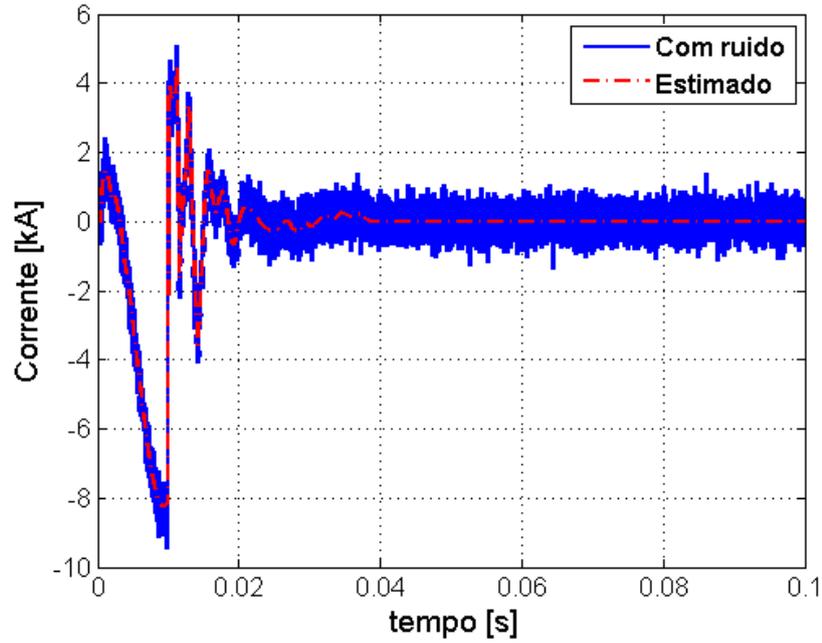


Figura 4.14: Resultados da simulação da corrente de Arco para o modelo de Mayr-Portela

Tabela 4.7: Resultados de Identificação de Parâmetros do Arco Secundário

Mayr-Portela	$A_1(A/\mu s)$	$A_2(A/\mu s)$	α	$B(GW)$	β
Sem ruído	3.869	75.335	0.0987	0.3995	0.1938
Com ruído	3.749	73.8	0.0952	0.386	0.191

estimador linear também utilizando o método de mínimos quadrados, onde também poderia ter sido utilizado um método de otimização.

Nessa etapa realizamos dois testes de estimação, um com e outro sem adicionar ruído. Os resultados da identificação dos parâmetros para o caso do arco secundário, aplicando o método proposto, são mostrados na Tabela 4.7.

A Fig. 4.14 mostra a corrente para o modelo de arco Mayr-Portela, quando a corrente simulada está livre de ruído e a Fig. 4.14 mostra os resultados considerando o ruído.

O estimador tem um bom desempenho para dados dos circuitos de simulação tanto para disjuntor, como para arco secundário, para diferentes modelos de arco.

Observando o bom desempenho do estimador para dados com ruído branco, onde

os erros são relativamente baixos oscilando de 1% a 3%. O próximo passo é aplicar o estimador proposto para casos reais ou experimentais, como pode ser visto no próximo capítulo.

4.2 Identificação do Arco Elétrico para Casos Experimentais

Para caso do arco no ar, foi montado um circuito no laboratório de Corona utilizando um espinterômetro com dois eletrodos de liga de tungstênio, fabricados especialmente para este tipo de experiência. Os eletrodos possuem uma curvatura adequada nas pontas para evitar que o arco se desloque de um lado para outro, como nos espinterômetros com esferas, como evidenciado em [2]. O circuito é composto ainda, por um autotransformador de 0,11/80 kV de baixa potência e resistências para alta tensão. Para a fase de medição, utilizamos um divisor de tensão resistivo em série com o arco para medir a corrente, e um divisor de tensão capacitivo em paralelo com o arco para medir a tensão. Os equipamentos utilizados para realizar o experimento de arco no ar são mostrados nas Fig. 4.40 - 4.23.

A ignição do arco é feita por aumento da tensão até valores maiores que a tensão disruptiva do ar. Os detalhes da obtenção de dados para o caso de arco no disjuntor podem ser vistos em [52].

4.2.1 Montagem Experimental

A tensão e corrente do arco foram aferidas de forma indireta, levando em conta que os transdutores medem tensão. A tensão total é medida pelo transdutor (divisor de tensão capacitivo) na saída do transformador elevador V_C . O valor medido corresponde à tensão no lado de menor queda de tensão e o valor real total pode ser determinado multiplicando o valor obtido pela relação de transformação do divisor capacitivo RT_c .

O transdutor de corrente (divisor de tensão resistivo) que está conectado em série com o arco mede a queda de tensão nessa parcela do circuito V_R . Conhecendo o valor da resistência R_r , podemos determinar a corrente do arco. A tensão do arco foi determinada através de um cálculo simples como mostrado em (4.7) e (4.8).

$$V_R = RT_r * V_r \tag{4.7}$$

$$V_C = RT_c * V_c$$



Figura 4.15: Circuito implementado para representar o arco no ar

$$\begin{aligned}
 V_{arco} &= V_C - V_R \\
 I_{arco} &= V_r / R_r
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Os valores das resistências dos transdutores e as relações de transformação são detalhados na parte correspondente a componentes do circuito.

A Fig. 4.24 mostra o diagrama unifilar do circuito utilizado no laboratório para o caso de arco no ar. Para o caso do disjuntor, o circuito pode ser visto em [52].

O circuito implementado no laboratório pode ser visto na Fig. 4.15 e os equipamentos utilizados na experiência são detalhados a seguir.

4.2.2 Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação é formada por um autotransformador elevador de 0,11/80 kV, que é alimentado por um “variac” no lado de baixa tensão. No lado de alta tensão, é adicionado um conjunto de resistências para limitar a corrente no secundário devido a baixa potência do transformador.

O autotransformador é de 7.5 kVA com relação de transformação 0,11/80 kV, marca GE, com ponto comum entre baixa e alta tensão conectado à carcaça e aterrado como mostrado na Fig. 4.16

O conjunto de resistências é formado por resistências de 50 kΩ com um total de 350 MΩ.



Figura 4.16: Autotransformador 0,11/80 kV

4.2.3 Espinterômetro

O espinterômetro utilizado é feito de madeira com dois eletrodos com ponta cônica boleada instalados na configuração vertical. O material utilizado para a fabricação dos espinterômetros é de uma liga de tungstênio. Mais detalhes podem ser vistos em [55].

O ajuste dos espaçamentos entre eletrodos é feito manualmente por meio de um contrapeso de metal instalado na parte baixa do espinterômetro e controlado por uma manivela circular com uma rosca, que trava os eletrodos na posição requerida. Na base do eletrodo inferior está demarcada uma régua com linhas a cada centímetro para facilitar o posicionamento dos eletrodos na distância requerida, como mostrado na Fig. 4.17.



Figura 4.17: Espinterômetro



Figura 4.18: Detalhes dos eletrodos



Figura 4.19: Detalhes do eletrodo



Figura 4.20: Detalhes do eletrodo

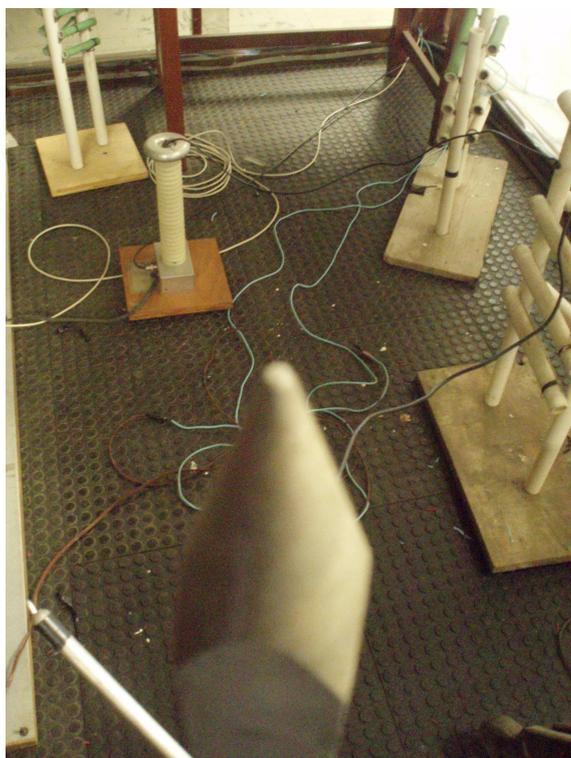


Figura 4.21: Detalhes do eletrodo



Figura 4.22: Divisor Resistivo para Medição da Corrente de Arco

4.2.4 Circuitos e Equipamentos de Medição

O sistema de medição é composto por um divisor de tensão resistivo, um divisor de tensão capacitivo, cabo de transmissão do sinal, osciloscópio digital, multímetro, amperímetro e um PC, e mais o sistema de aterramento, que garante a referencia próxima a potencial zero.

4.2.4.1 Transdutor de Corrente e Tensão

Para medir a corrente do arco é utilizado um divisor de tensão resistivo. A unidade de baixa tensão é de 50Ω , e relação de transformação é de $RT_R = 7970$.

Para medir a tensão do arco utilizamos um divisor de tensão capacitivo, com relação de transformação de $RT_R = 10707$.

Detalhes sobre as características construtivas dos divisores de tensão e sobre o cabo de transmissão de sinal podem ser vistos em [55], como mostrado nas Fig. 4.22 e 4.23 .

4.2.5 Instrumentos de Medição

Os instrumentos utilizados para medição dos dados são um osciloscópio digital marca Fluke de 50 MHz, com saída USB para o PC, e um programa que faz a leitura e a



Figura 4.23: Divisor Capacitivo para Medição da Tensão de Arco

gravação dos dados lidos pelo osciloscópio.

Um multímetro foi utilizado para verificar a tensão no primário do transformador e um amperímetro em serie com o circuito de baixa tensão para verificar a corrente.

4.2.6 Arco Elétrico no Ar

Para essa parte do trabalho, numerosos testes foram realizados no laboratório, até conseguir dados que representem o comportamento do arco no ar. Foram tomados cuidados especiais nas medições e na gravação dos dados.

Depois de obter dados adequados, procedemos ao calculo da tensão e da corrente no arco. A medição da corrente foi realizada indiretamente com um divisor resistivo, a tensão foi medida, e, conhecendo a resistênciã interna, obtivemos a corrente que circula no arco. No cálculo da tensão, levamos em conta a capacitancia e a tensão ânodo-catodo devido à proximidade das pontas. As distancias entre os eletrodos do espinterômetro variam de 1 a 5 cm.

O procedimento foi realizado aumentando a tensão da fonte, no lado de baixa tensão do circuito, que alimenta a rede através de um “variac”, até que a tensão fosse suficiente para gerar o arco. Depois da ignição do arco, elevamos a tensão, que foi mantida por um tempo determinado, e depois diminuimos a tensão até a extinção

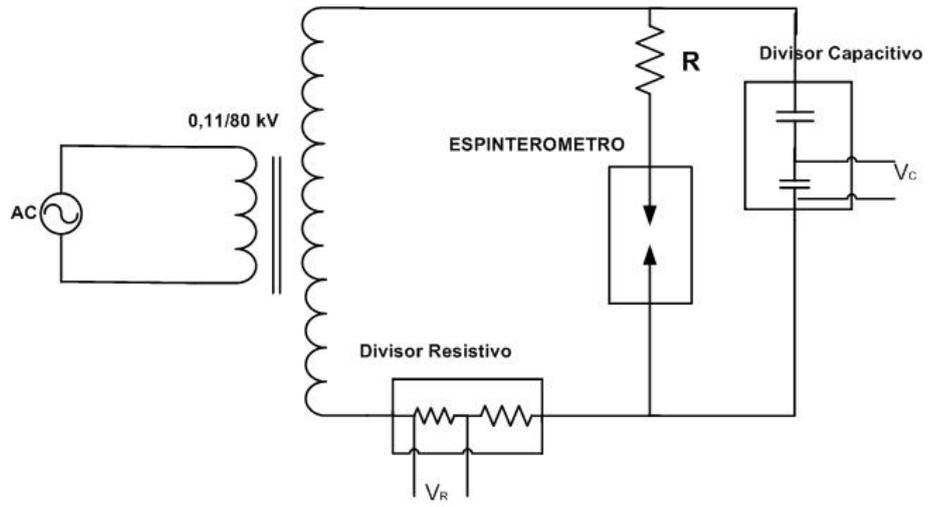


Figura 4.24: Diagrama Unifilar do circuito montado no laboratório

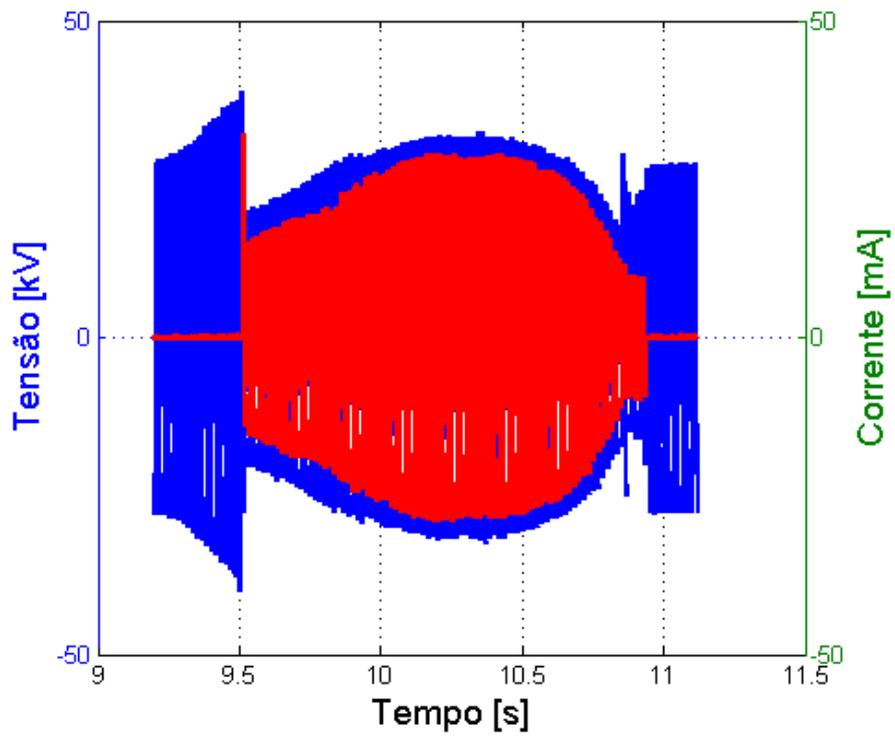


Figura 4.25: Tensão e Corrente da fonte que alimenta o Arco

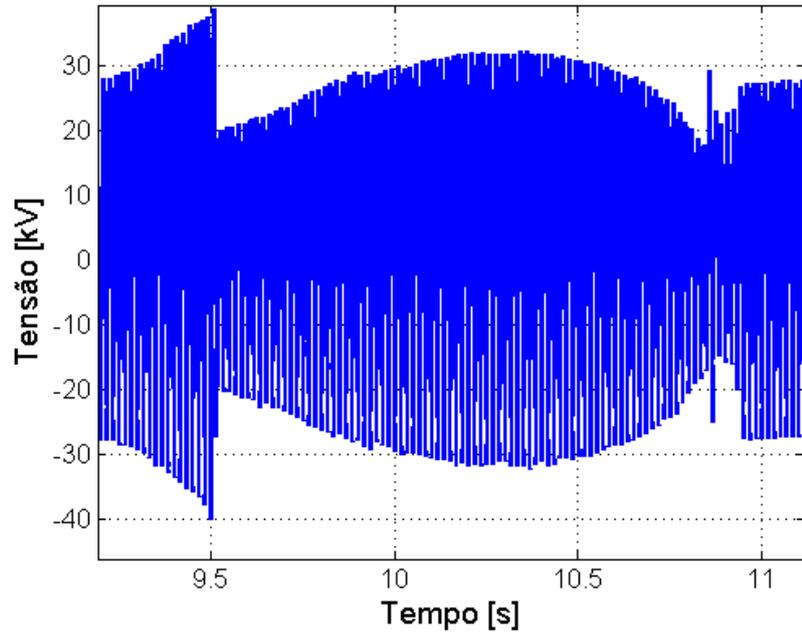


Figura 4.26: Tensão na fonte que alimenta o Arco

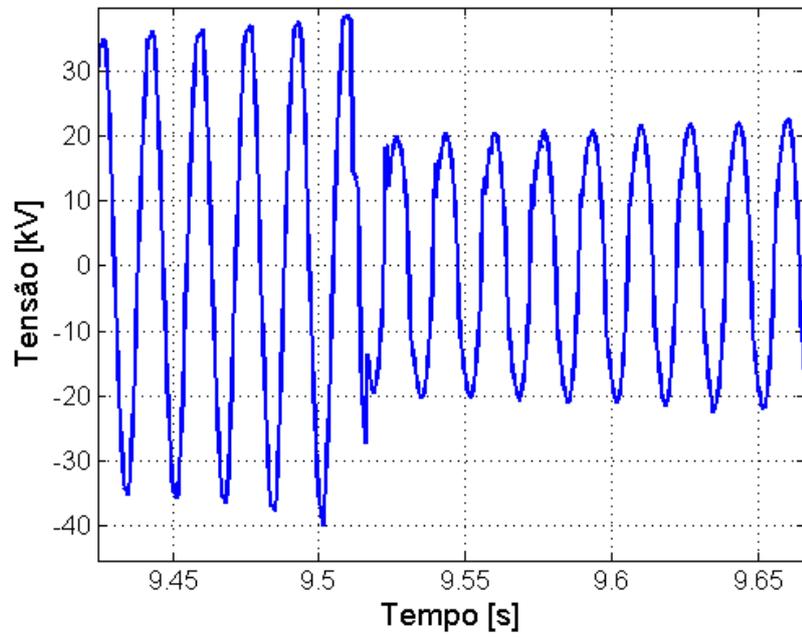


Figura 4.27: Detalhe da tensão-Início do arco

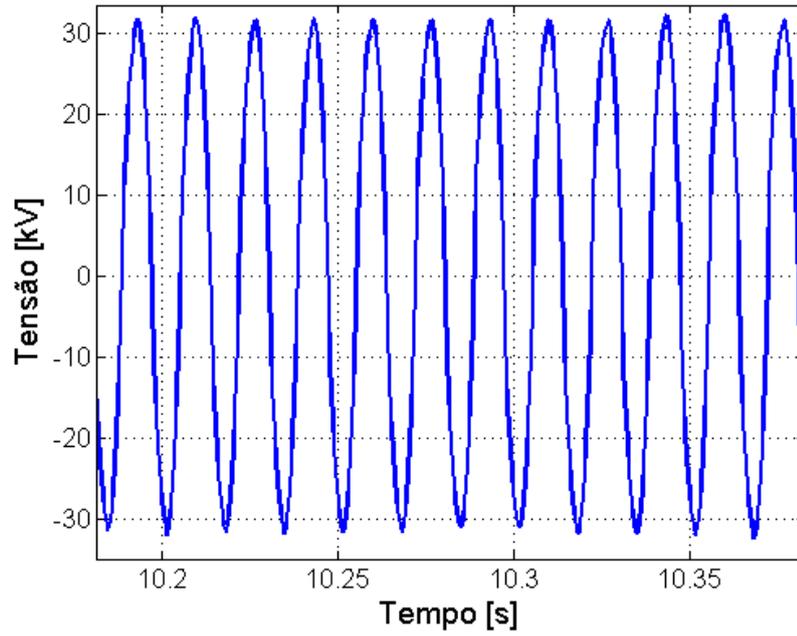


Figura 4.28: Detalhe da tensão

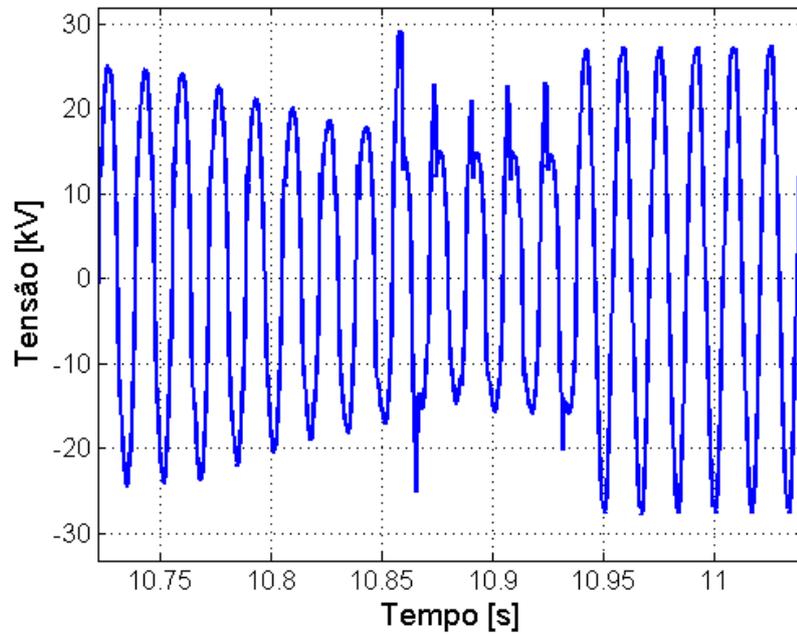


Figura 4.29: Detalhe da tensão-extinção do arco

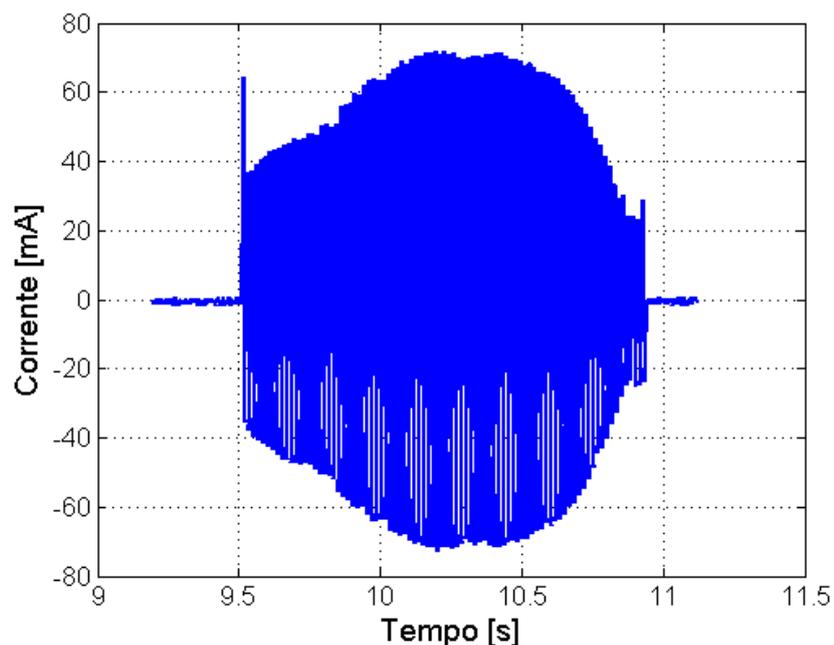


Figura 4.30: Detalhe da Corrente do Arco

do arco. O experimento foi realizado em condições ambientais estáveis, dentro de um laboratório fechado e livre de vento. O laboratório foi isolado com plástico para evitar que se tenha a ação do vento no arco. Desse ponto de vista, a extinção do arco é feita por diminuição da tensão.

Das inúmeras medições, selecionamos alguns dos melhores exemplos, que são mostrados a seguir. Podemos observar o comportamento tanto da tensão como da corrente medidas nos divisores de tensão (resistivo e capacitivo), como mostrado nas figuras abaixo. Fazendo um cálculo matemático simples de acordo com a equação (2.12) determinamos a tensão e corrente efetiva do arco, como mostrado nas figuras a seguir.

Um fenômeno que observamos é que o arco gera ruídos e perturba o sistema que o alimenta. No caso do transformador, esses transitórios de alta frequência modificam o valor da sua indutância interna. Para analisar esse fenômeno, fizemos medições para determinar os parâmetros do transformador.

Na Fig. 4.38, observamos a curva característica tensão-corrente do arco e na Fig. 4.39 observamos a condutância do arco. Para ilustrar melhor o trabalho, mostramos algumas fotos (Fig. 4.40 a 4.23) tiradas no laboratório de Corona. Mostramos os equipamentos utilizados para gerar o arco no ar.

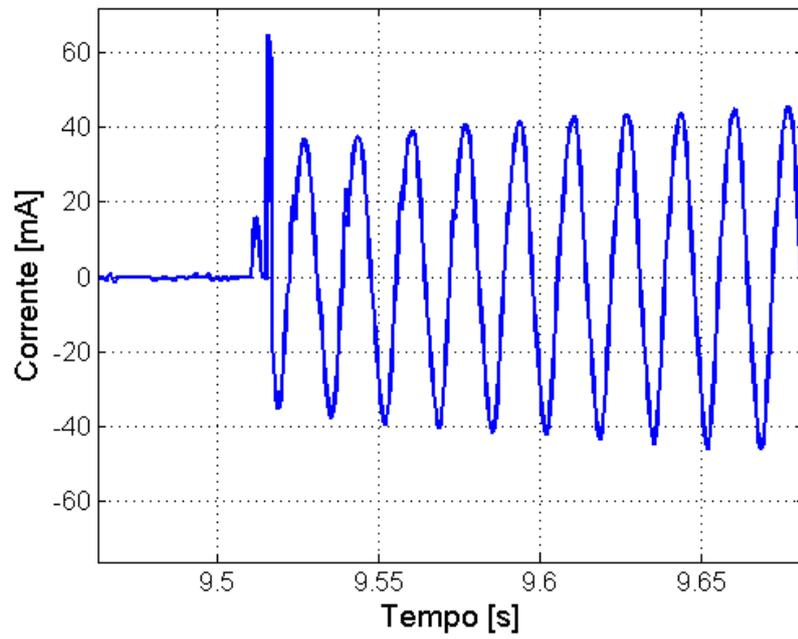


Figura 4.31: Detalhe da Corrente-Inicio do Arco

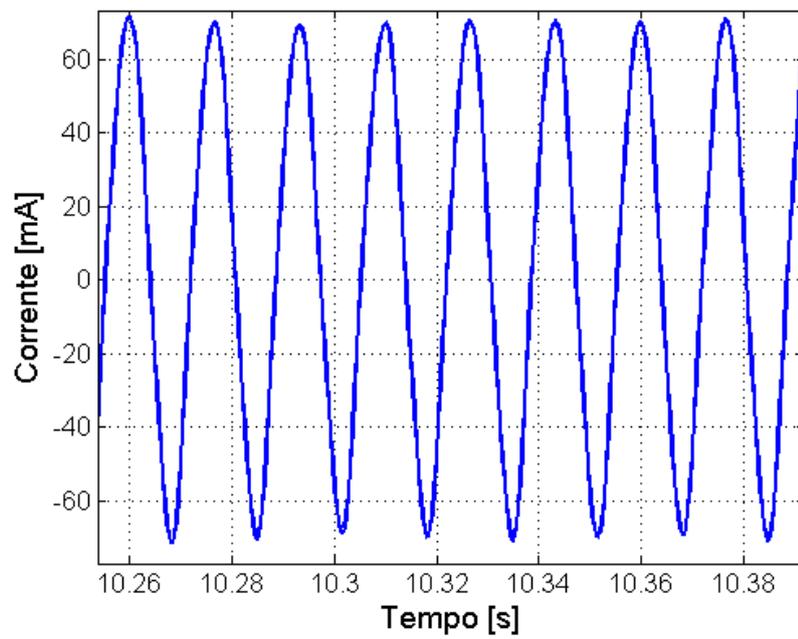


Figura 4.32: Detalhe da Corrente

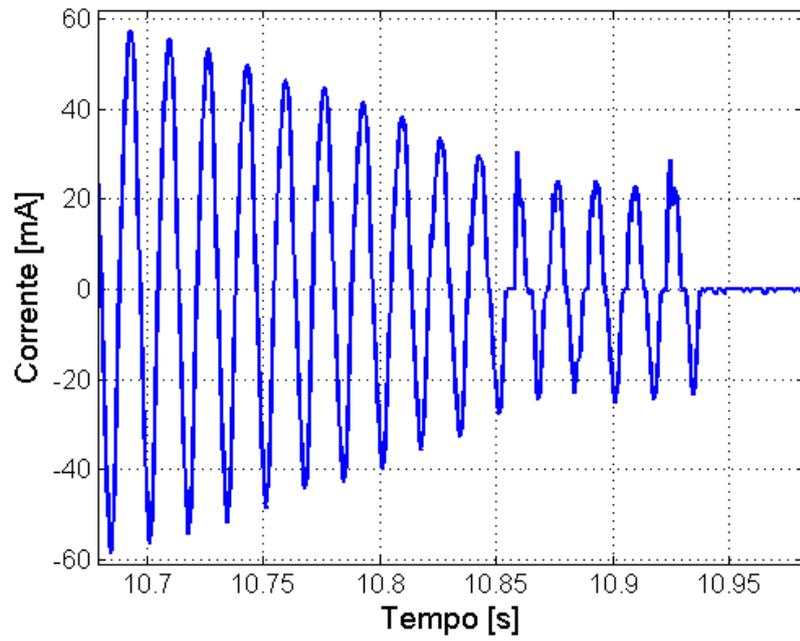


Figura 4.33: Detalhe da Corrente-extinção do Arco

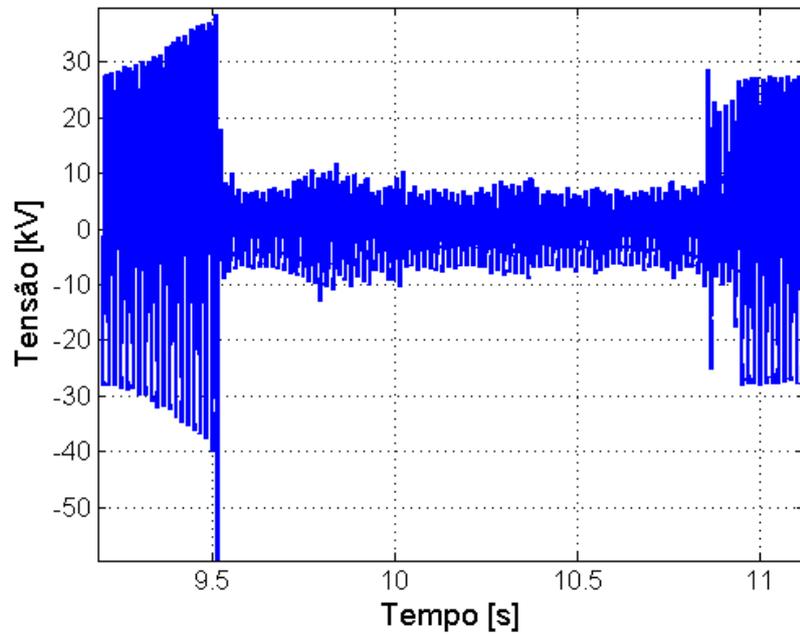


Figura 4.34: Tensão do Arco

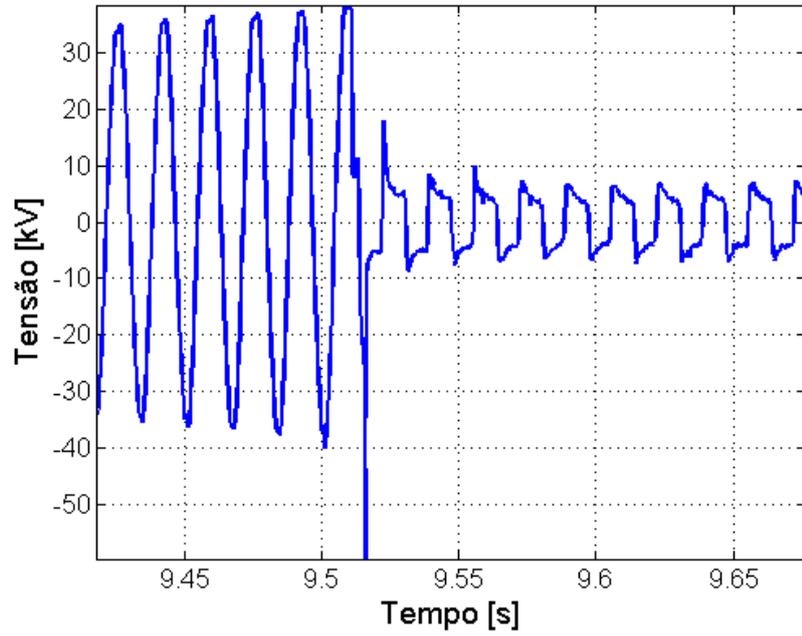


Figura 4.35: Detalhe da tensão-Início do Arco

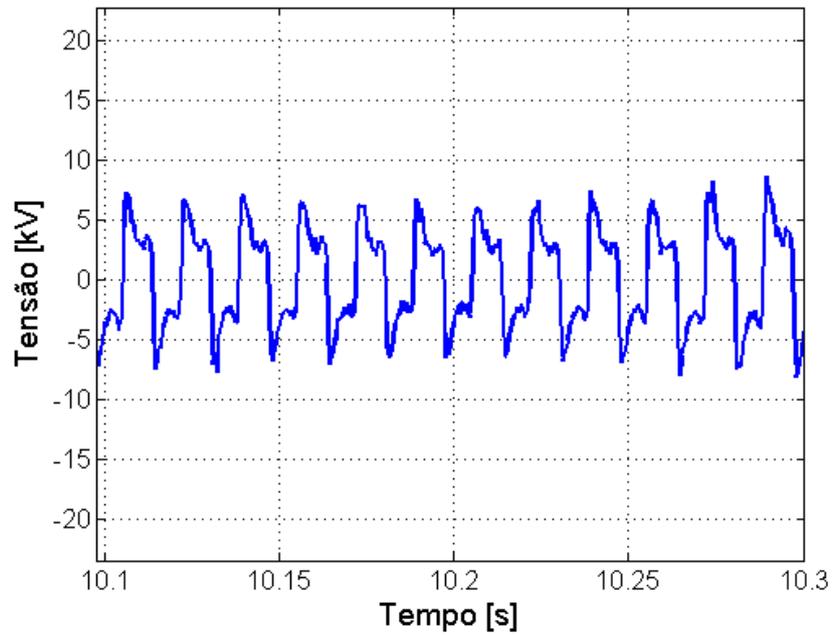


Figura 4.36: Detalhe da tensão

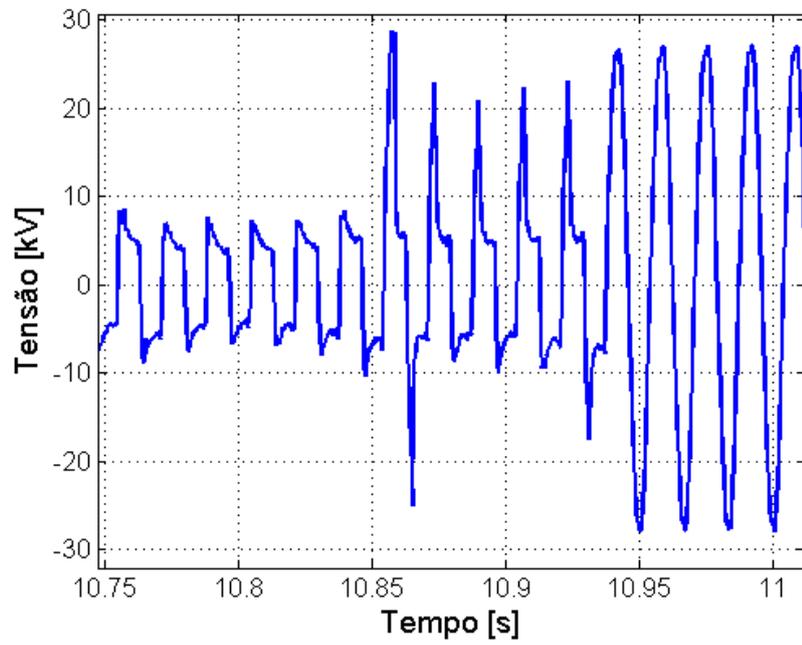


Figura 4.37: Detalhe da tensão-extinção do arco

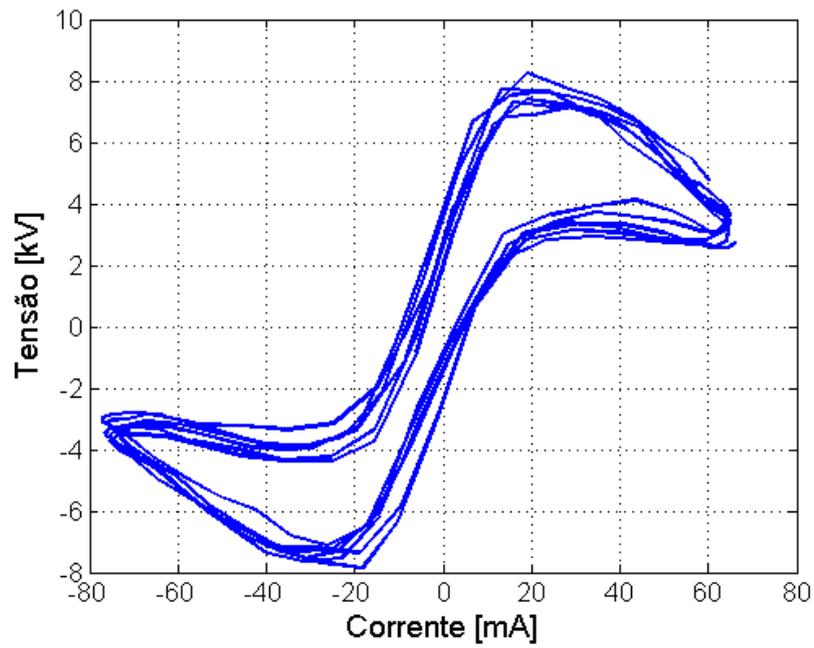


Figura 4.38: característica tensão-corrente

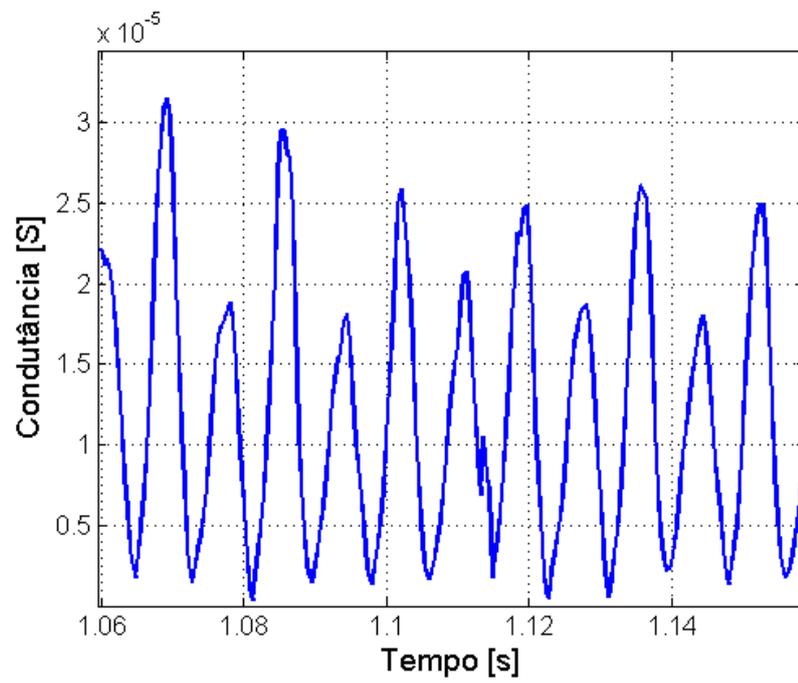


Figura 4.39: condutância do arco



Figura 4.40: Circuito implementado para representar o arco no ar



Figura 4.41: Circuito implementado para representar o arco no ar

4.3 Estimação dos Parâmetros do Arco Elétrico Experimental

Tanto para disjuntores como para arco no ar, foram considerados três modelos. O modelo de Schwarz ou de uma “constante” de tempo, e modelos de duas constantes de tempo, Thiel modificado e Mayr-Portela. Depois de um rearranjo matemático nos três modelos se obtém um modelo em espaço de estado, como mostrado no Capítulo 3. O objetivo é determinar os respectivos parâmetros para cada modelo mencionado, utilizando o método de estimação estado/parâmetros, previamente descrito no capítulo anterior. Dados obtidos a partir de medições no laboratório são utilizados para os dois casos.

A validação das respostas obtidas, utilizando o método de estimação proposto, é feita tomando como referencia valores de parâmetros calculados através de métodos existentes na literatura técnica [2, 50, 51].

Para a identificação dos parâmetros do modelo de Thiel modificado e modelo de Mayr-Portela os parâmetros B and β são considerados constantes. Portanto, precisamos obter os seguintes parâmetros A_1 , A_2 , α . As constante de tempo são estimadas usando

$$\begin{aligned}\log(\tau) &= \log(A) + \alpha \log(\tau) \\ \log(P_0) &= \log(B) + \beta \log(g)\end{aligned}\tag{4.9}$$

4.3.0.1 Arco Elétrico no Disjuntor

Os dados obtidos para essa parte do trabalho foram extraídos de uma dissertação de mestrado realizada na UFRJ [52].

As Fig. 4.42, 4.43 e 4.44 mostram a tensão, a corrente e a condutância do arco dentro de um disjuntor, medidos dentro do laboratório.

Os modelos utilizados para essa parte do trabalho são os modelos de Mayr, Schwarz, de Thiel modificado e o modelo de Mayr portela.

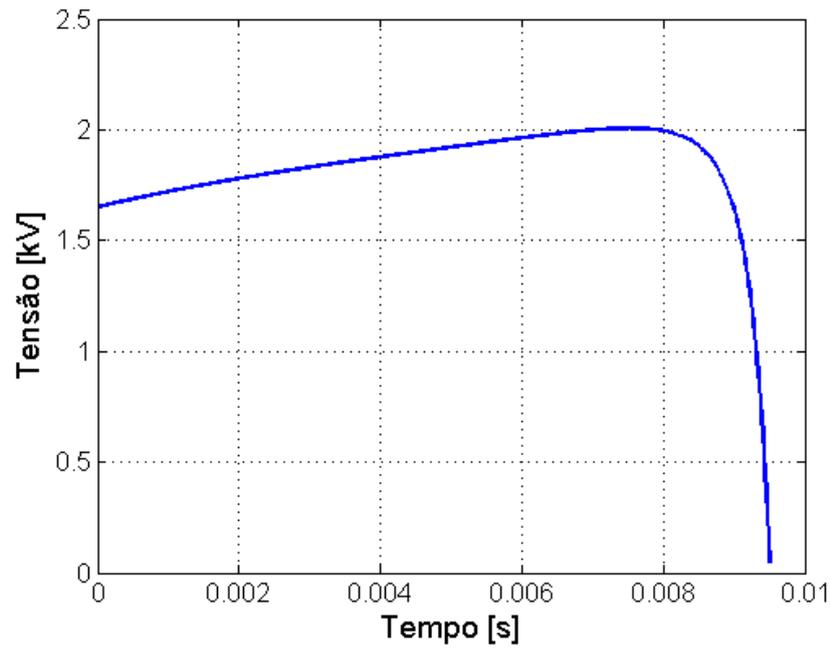


Figura 4.42: Tensão do arco dentro do Disjuntor

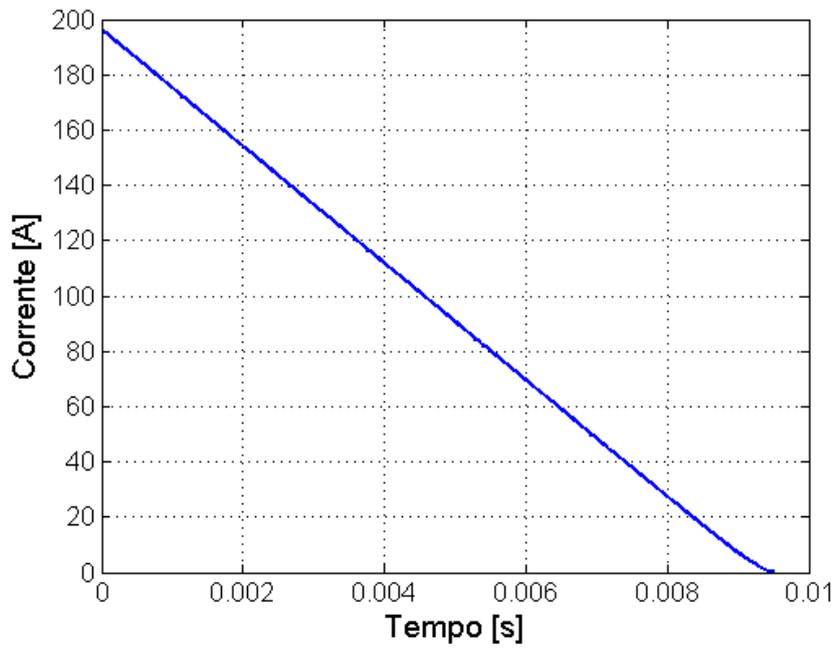


Figura 4.43: Corrente do arco dentro do Disjuntor

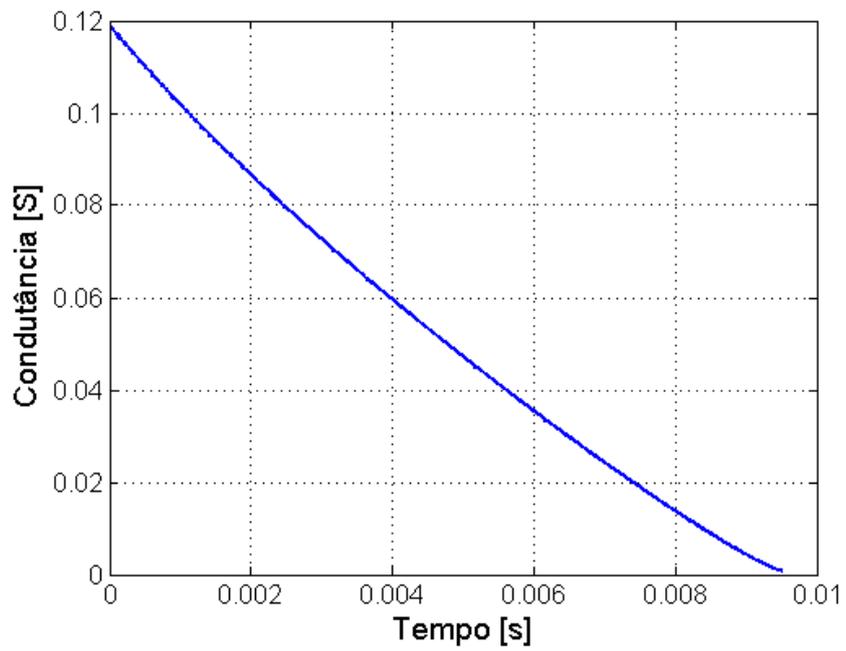


Figura 4.44: Condutância do arco dentro do Disjuntor

Tabela 4.8: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Mayr

modelo de arco	$\tau_m(\mu s)$	$P_0(MW)$
Mayr	127	.4390

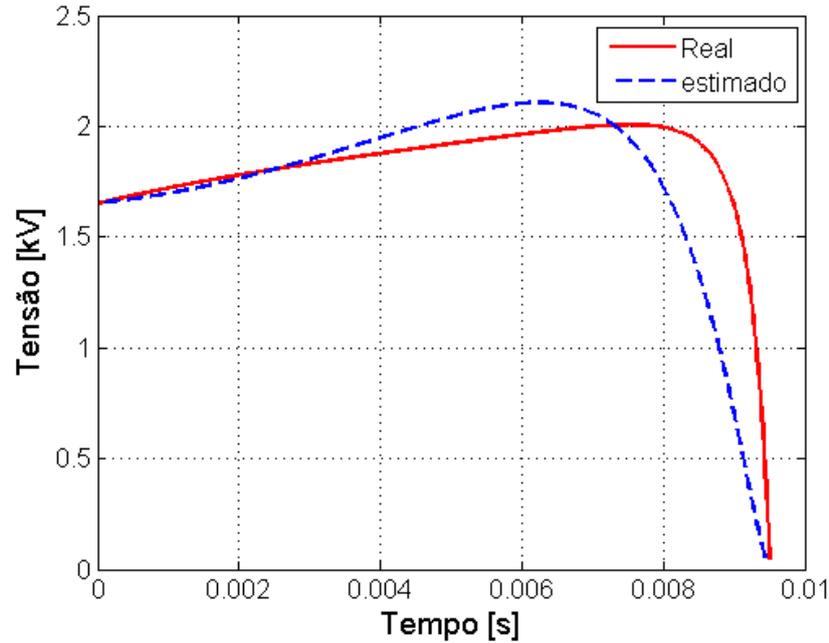


Figura 4.45: Tensão do arco no Disjuntor-Mayr

4.3.1 Para o Modelo de Mayr

Calculamos os parâmetros para o modelo de Mayr. Os procedimentos de estimação dos parâmetros são os mesmos da seção anterior. As Fig. 4.45, 4.46 e 4.47 mostram os resultados da estimação para o modelo de Mayr.

Os resultados de estimação dos parâmetros para o disjuntor são mostrados na tabelas 4.8.

4.3.1.1 Para o Modelo de Schwarz

As Fig. 4.48, 4.49 e 4.50 mostram os resultados da estimação para o modelo de Schwarz. Os resultados de estimação dos parâmetros para o disjuntor são mostrados na tabela 4.9.

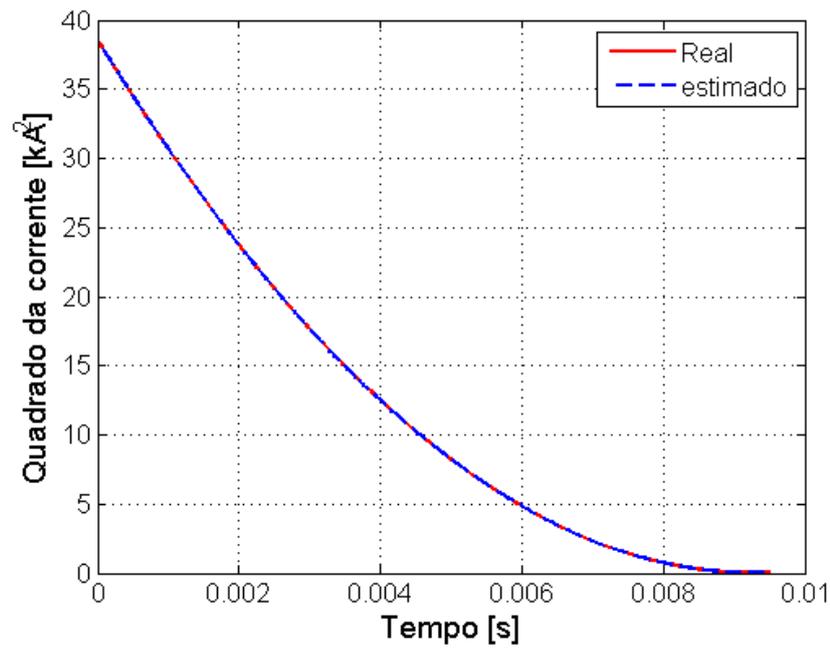


Figura 4.46: Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor-Mayr

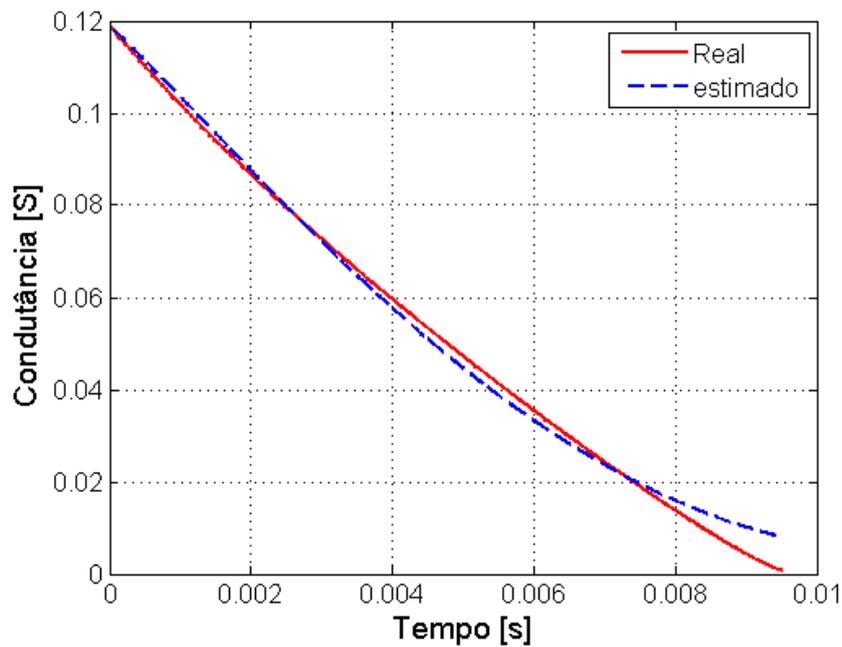


Figura 4.47: Condutância do arco no Disjuntor-Mayr

Tabela 4.9: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Schwarz

modelo de arco	$A(A/\mu s)$	α	B(GW)	β
Schwarz	1.4	0.5879	7.6555	0.6777

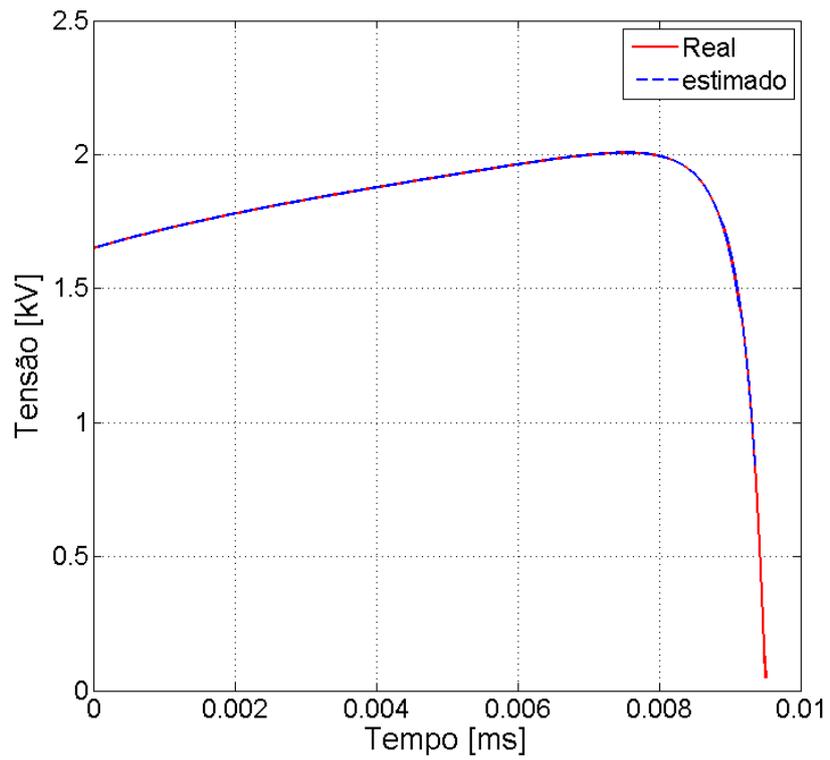


Figura 4.48: Tensão do arco no Disjuntor-Schwarz

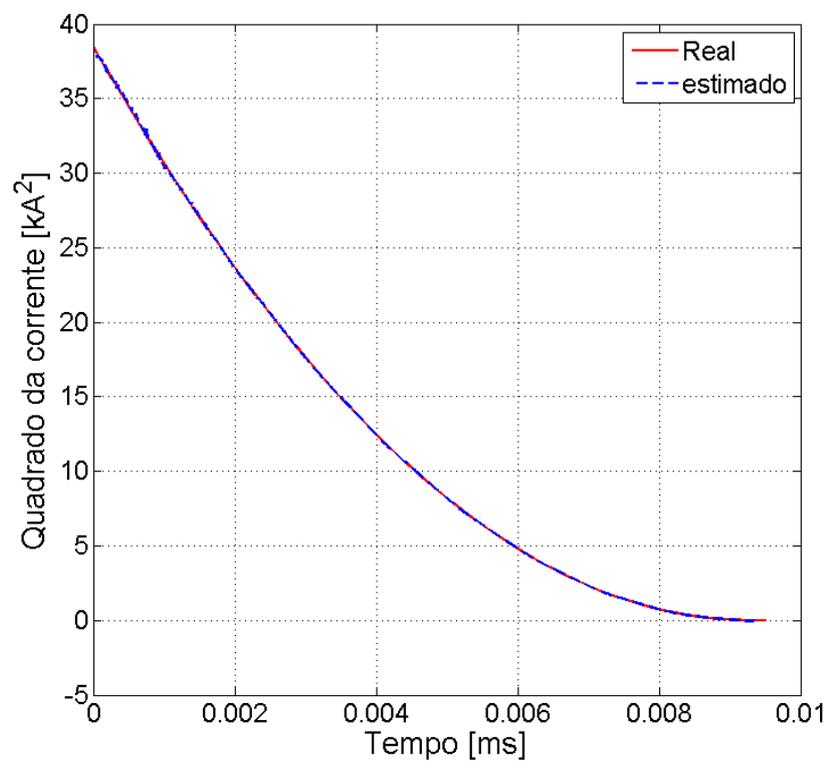


Figura 4.49: Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor-Schwarz

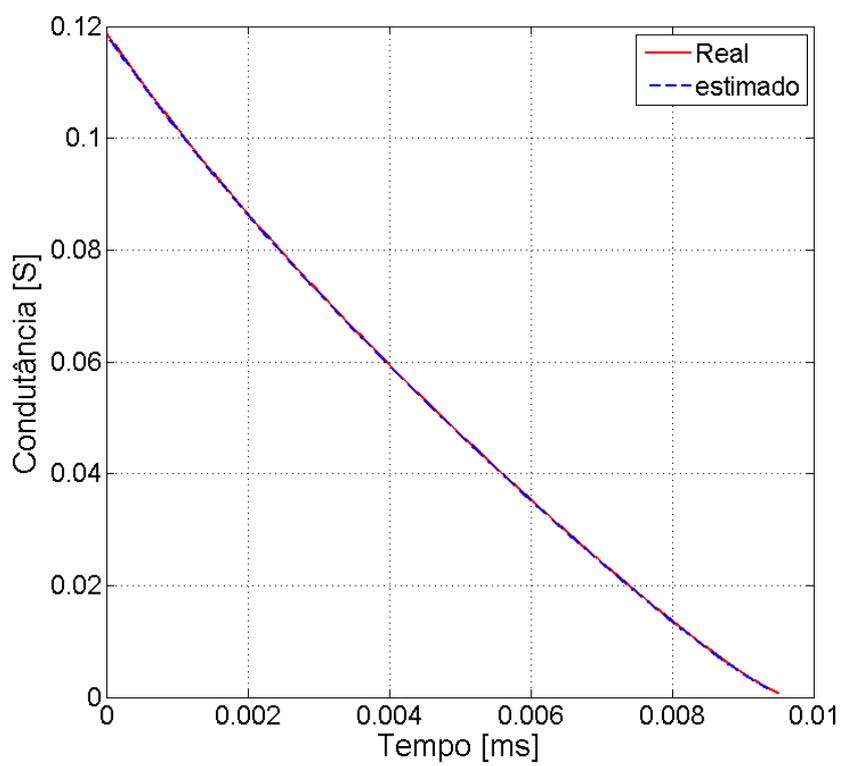


Figura 4.50: Condutância do arco no Disjuntor-Schwarz

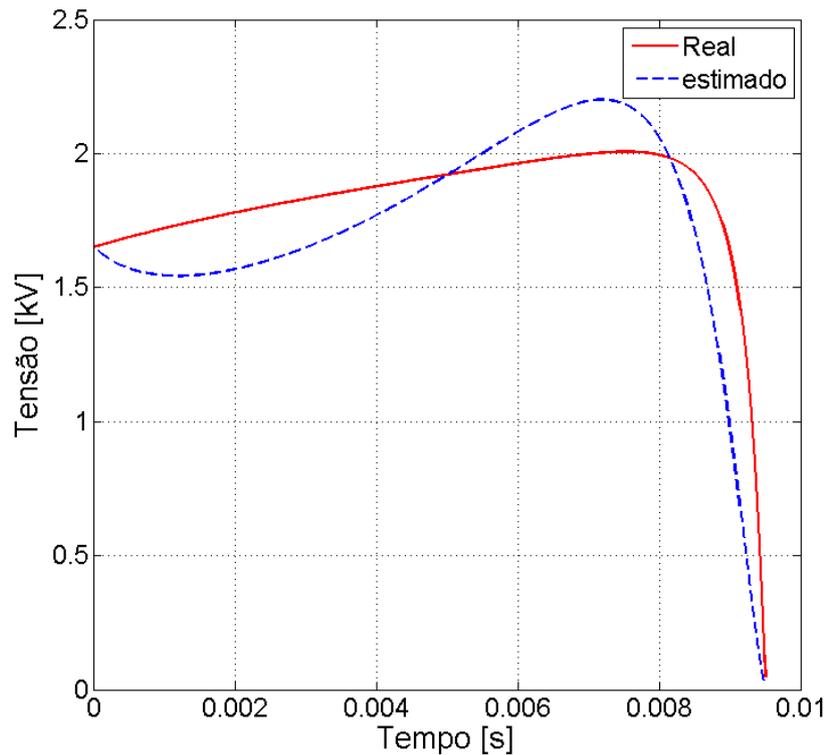


Figura 4.51: Tensão do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado

Tabela 4.10: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Disjuntor-Thiel Modificado

modelo de arco	$\tau_1(\mu s)$	$\tau_2(\mu s)$	$P_{01}(MW)$	$P_{02}(MW)$
Thiel Modificado	41.787	103.6222	1.02	.454

4.3.1.2 Para o Modelo de Thiel-Modificado e Mayr-Portela

Partindo das equações (3.17) e seguindo os mesmos passos descritos na seção anterior, calculamos os parâmetros do arco num disjuntor para o modelo de Thiel modificado, i.e com duas constantes de tempo τ_1 e τ_2 e as potências de resfriamento P_{01} e P_{02} respectivamente.

As Fig. 4.51, 4.52 e 4.53 mostram os resultados da estimação para o modelo de Thiel modificado. Os resultados de estimação dos parâmetros para o disjuntor são mostrados na tabela 4.10.

Nas Fig. 4.54, 4.55 e 4.56 observamos os resultados para o modelo de Mayr-Portela.

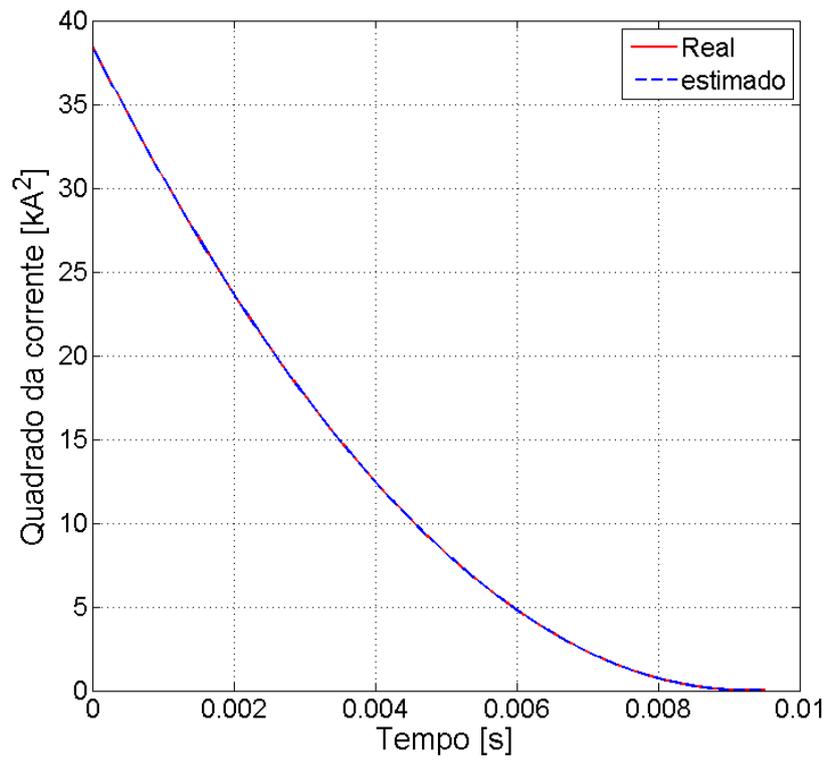


Figura 4.52: Quadrado da Corrente do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado

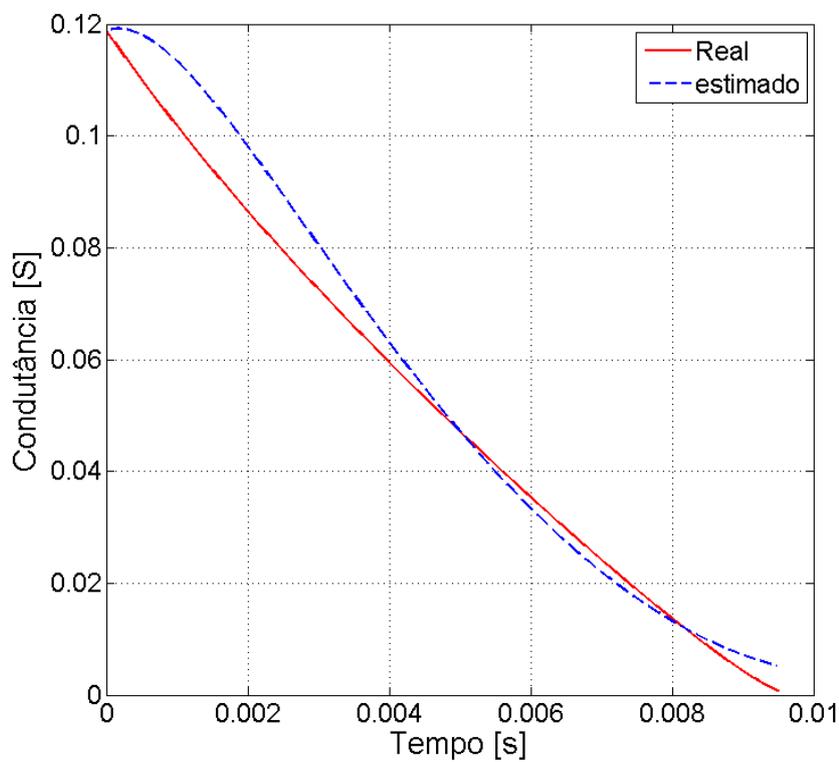


Figura 4.53: Constância do arco dentro do Disjuntor-Thiel Modificado

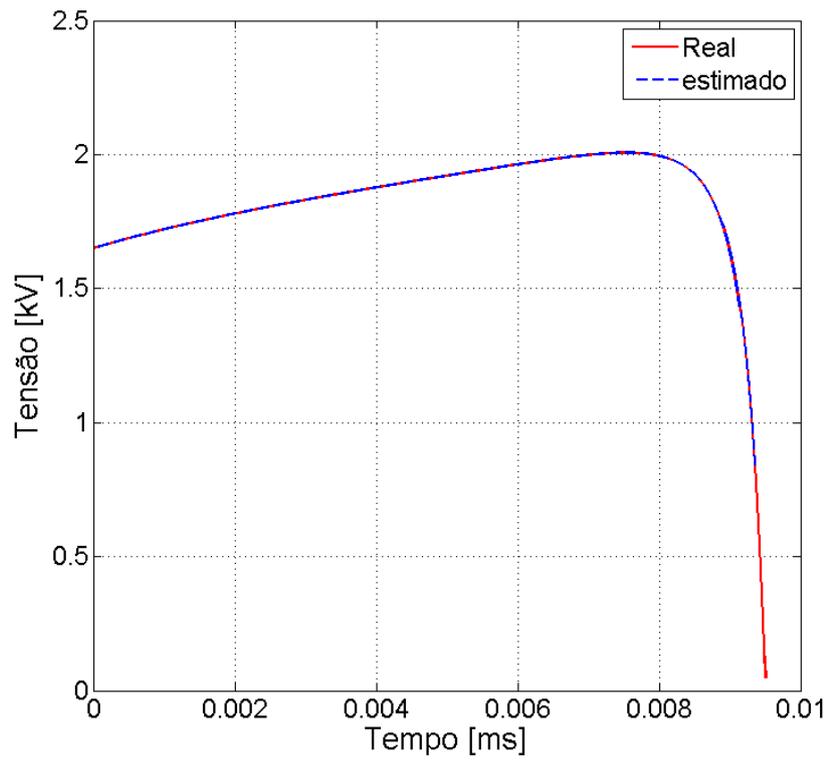


Figura 4.54: Tensão do arco no Disjuntor Mayr-Portela

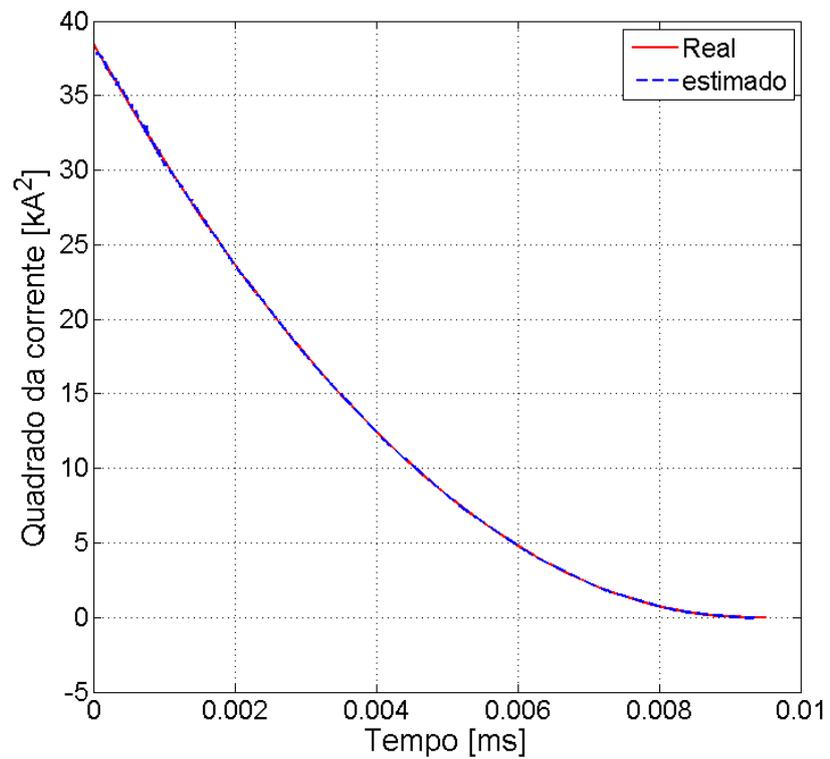


Figura 4.55: Quadrado da Corrente do arco no Disjuntor Mayr-Portela

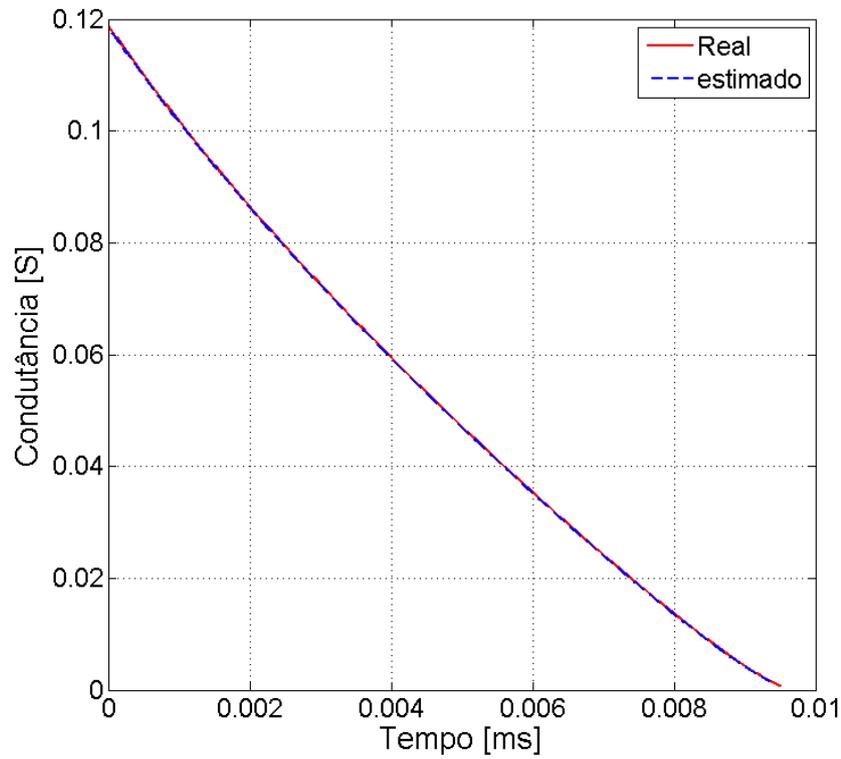


Figura 4.56: Quadrado da Condutância do arco no Disjuntor–Mayr-Portela

Tabela 4.11: Resultados de Identificação dos Parâmetros no Mayr-Portela

modelo de arco	$A_1(A/\mu s)$	$A_2(A/\mu s)$	α	$B(GW)$	β
Mayr-Portela	3.749	69.8	0.092	2.91	0.154

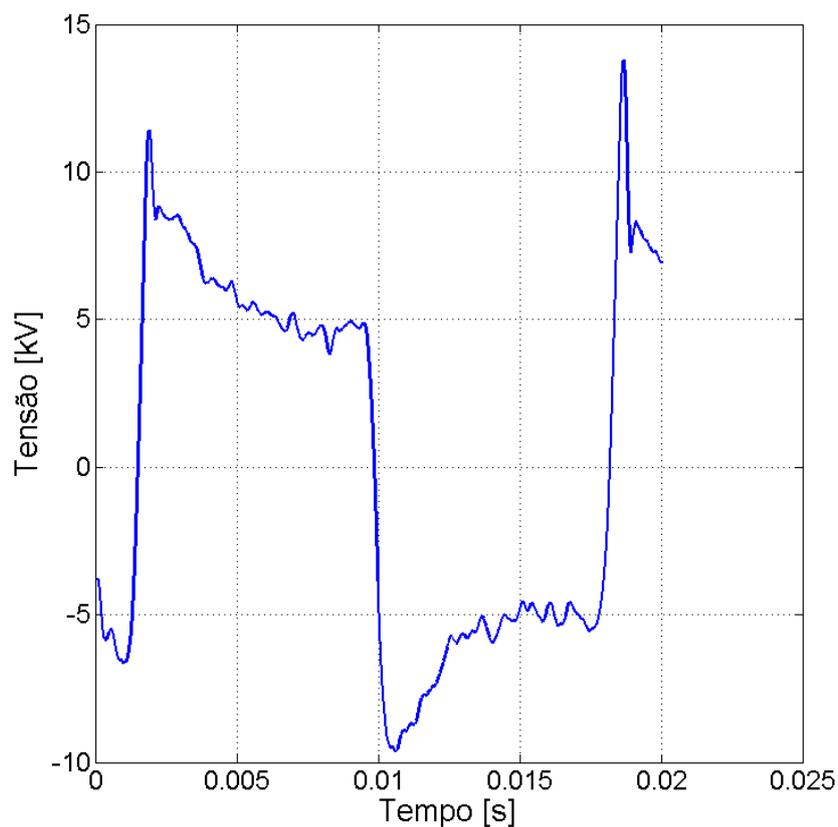


Figura 4.57: Tensão do arco no ar

4.3.1.3 Cálculo dos parâmetros do Arco no Ar

Depois de fazer as respectivas medições e analisar os dados, selecionamos os melhores para proceder ao cálculo dos parâmetros do arco no ar, utilizando os métodos proposto de estimação de parâmetros.

Alguns dados foram filtrados para eliminar ruídos, como valores fora dos limites ou absurdos que normalmente acontecem nas medições.

Os modelos utilizados para essa parte do trabalho são os modelos de Schwarz, o modelo de Thiel modificado e o modelo de Mayr-Portela.

4.3.2 Cálculo dos parâmetros para o Modelo de Schwarz

As Fig. 4.61, 4.62 e 4.63 mostram os resultados da estimação para o modelo de Schwarz.

Os resultados de estimação dos parâmetros para o arco no ar são mostrados na

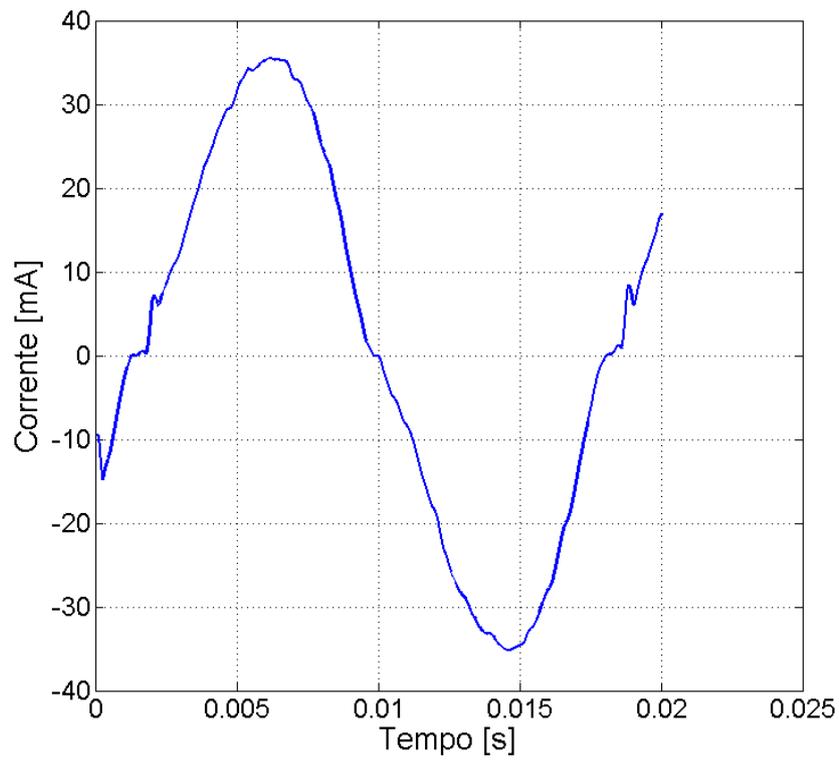


Figura 4.58: Corrente do arco no ar

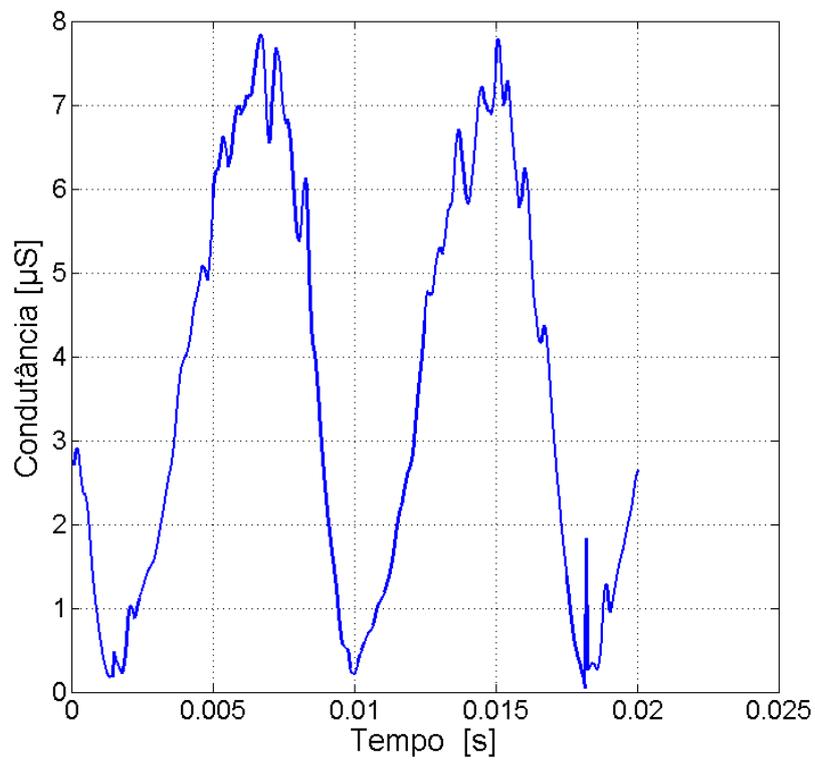


Figura 4.59: Condutância do arco no ar

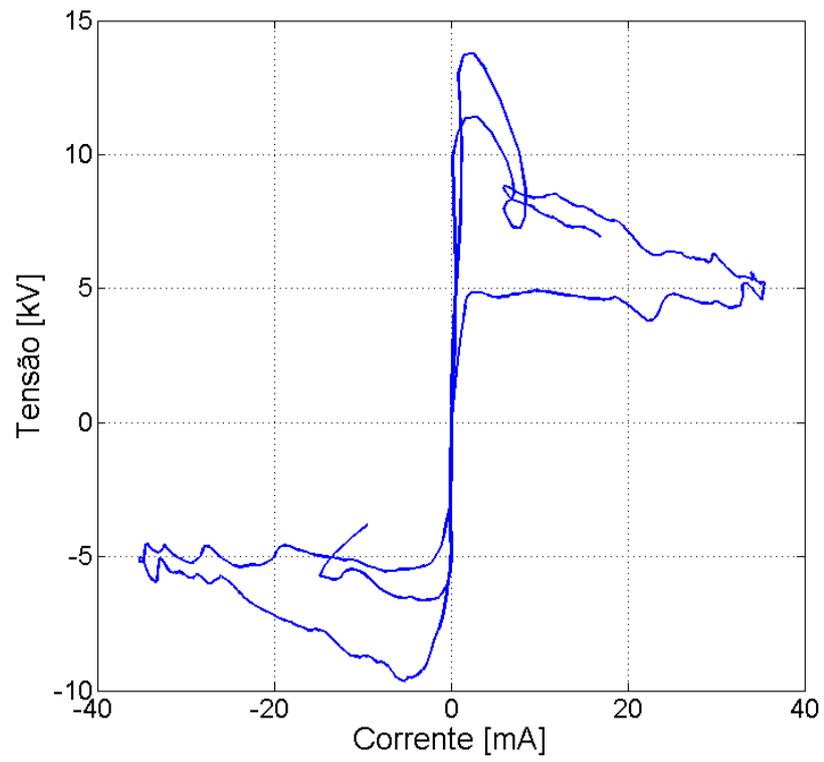


Figura 4.60: característica tensão-corrente

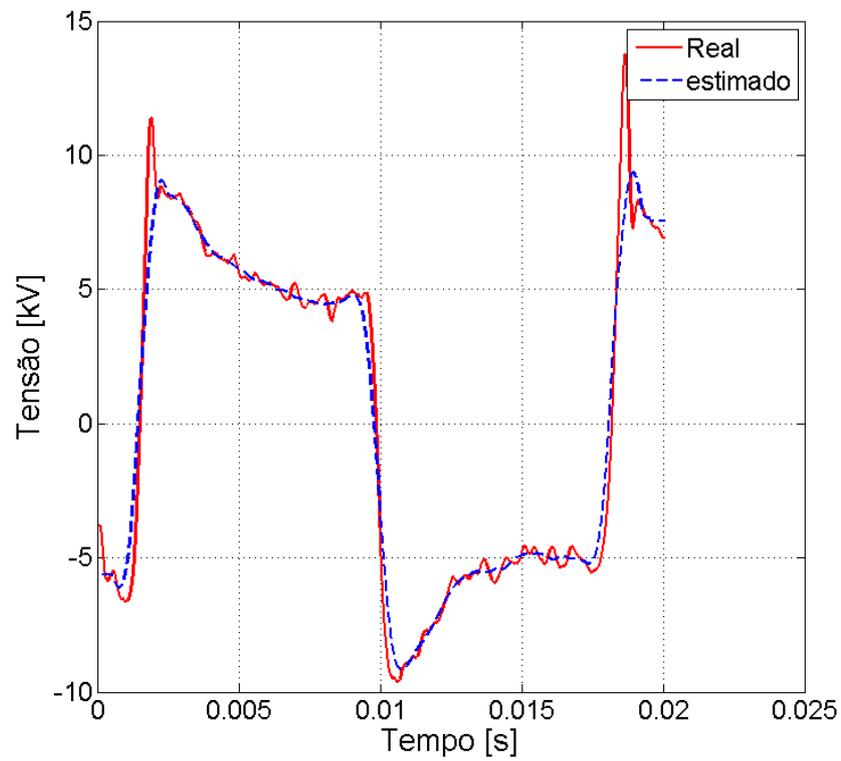


Figura 4.61: Tensão do arco no ar-Schwarz

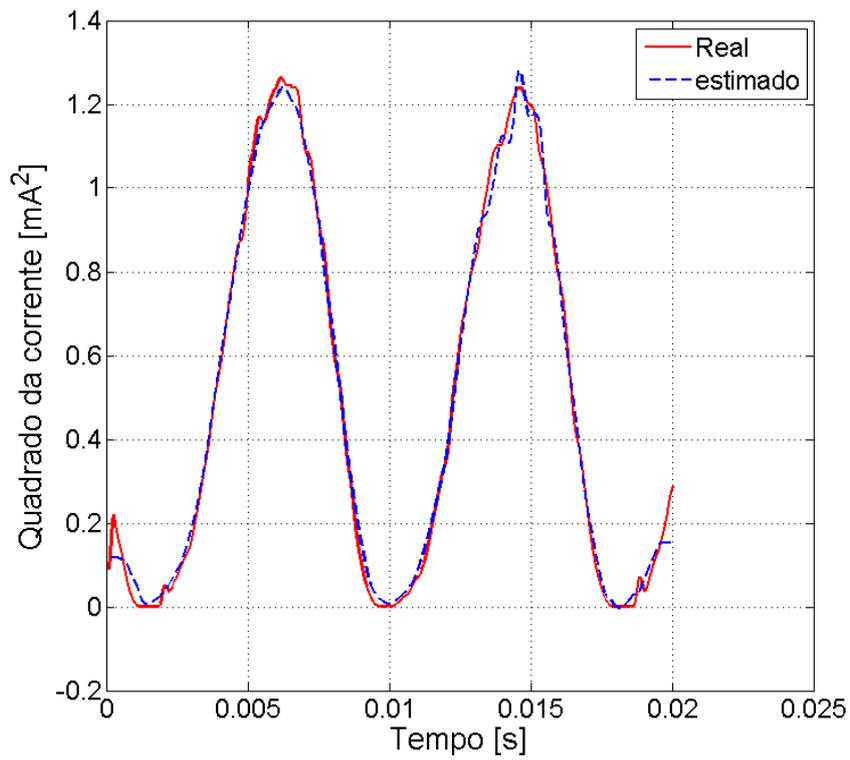


Figura 4.62: Quadrado da Corrente do arco no ar-Schwarz

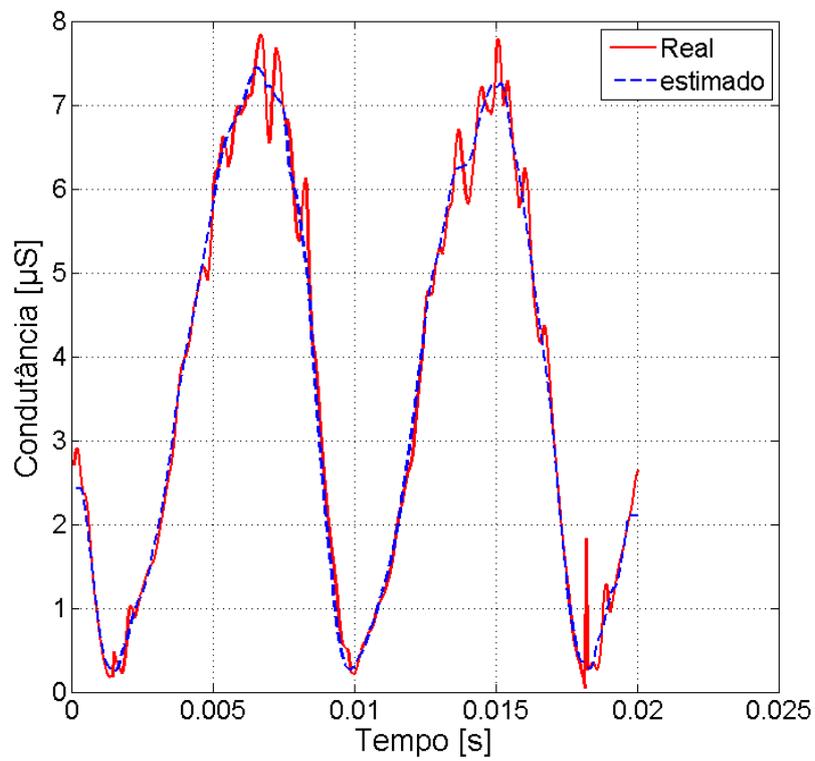


Figura 4.63: Condutância do arco no ar-Schwarz

Tabela 4.12: Resultados de Identificação dos Parâmetros no de arco no ar-Schwarz

modelo de arco	A ($A/\mu s$)	α	B (GW)	β
Schwarz	6.42	0.2722	.385	0.6407

Tabela 4.13: Resultados de Identificação dos Parâmetros para o arco no ar-Thiel Modificado

modelo de arco	$\tau_1(\mu s)$	$\tau_2(\mu s)$	$P_{01}(MW)$	$P_{02}(kW)$
Thiel Modificado	0.5429	15.6486	.558	.275

tabela 4.12.

4.3.2.1 Cálculo dos parâmetros para os modelos de Thiel Modificado e Mayr-Portela

Partindo das equações (3.24) e seguindo os mesmos passos descritos anteriormente, para o caso do modelo de Schwarz, calculamos os parâmetros do arco no ar, considerando que esse modelo tem duas constantes de tempo τ_1 e τ_2 e as potências de resfriamento P_1 e P_2 e adicionalmente os parâmetros η e ξ . Lembrando que η é um parâmetro que representa a interação dos dois sub-arcos.

$$\begin{aligned} \frac{dg_1}{dt} &= \left[\frac{n\phi}{\xi} - \frac{1}{\tau_1} \right] g_1 + \left[\frac{1}{\tau_1 P_{01}} \right] i_1^2 \\ \frac{dg_2}{dt} &= - \left[\frac{n\phi}{1-\xi} + \frac{1}{\tau_1} \right] g_2 + \left[\frac{1}{\tau_2 P_{02}} \right] i_2^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

As Fig. 4.64, 4.65 e 4.66 mostram os resultados da estimação para o modelo de Thiel modificado.

As Fig. 4.67, 4.68 e 4.69 mostram os resultados da estimação para o modelo de Mayr Portela.

Tabela 4.14: Resultados de Identificação dos Parâmetros para o arco no ar-Mayr-Portela

modelo de arco	$A_1(A/\mu s)$	$A_2(A/\mu s)$	α	B(GW)	β
Mayr-Portela	0.4688	137.49	.43	2.4	.88

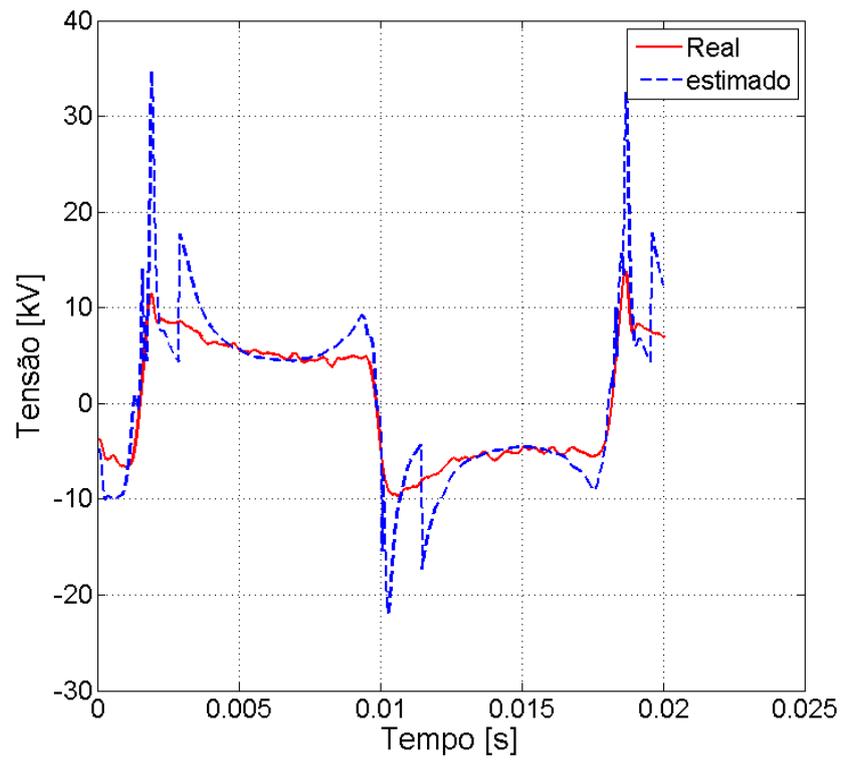


Figura 4.64: Tensão do arco no ar-Thiel Modificado

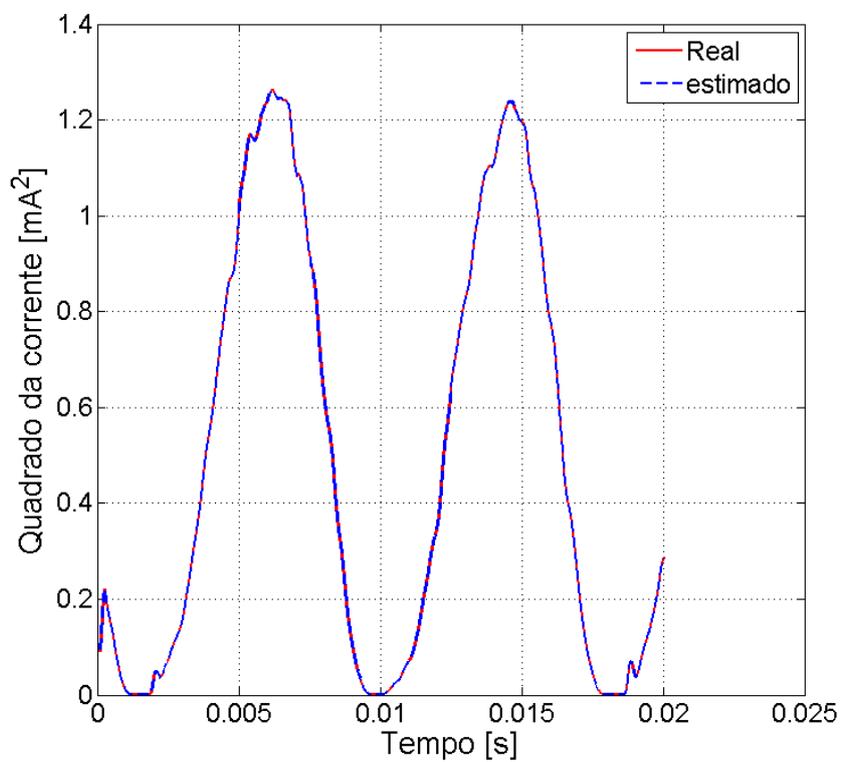


Figura 4.65: Quadrado da Corrente do arco no ar-Thiel Modificado

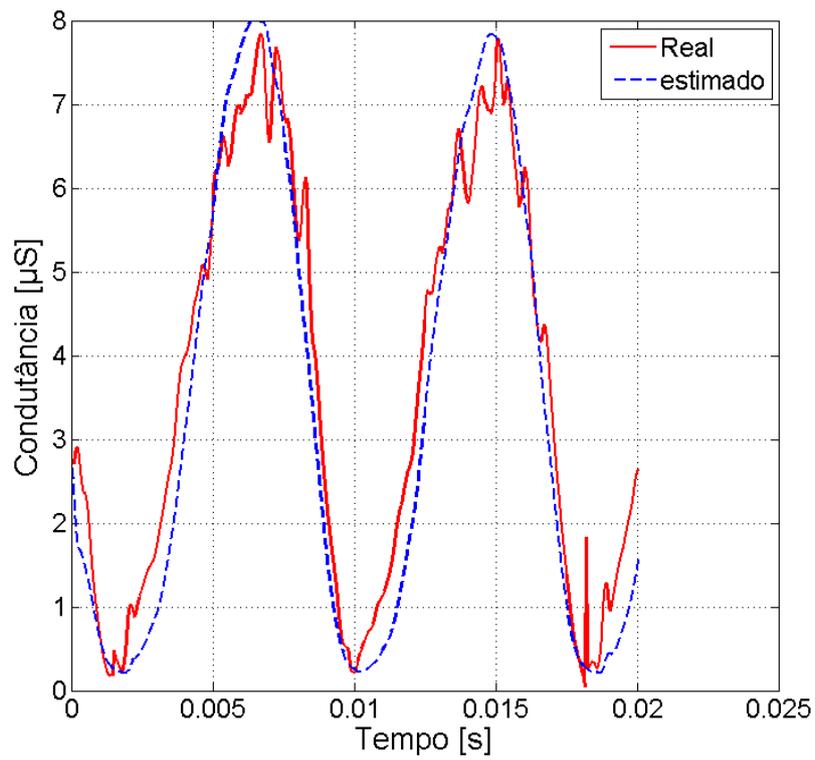


Figura 4.66: Condutância do arco dentro no ar-Thiel Modificado

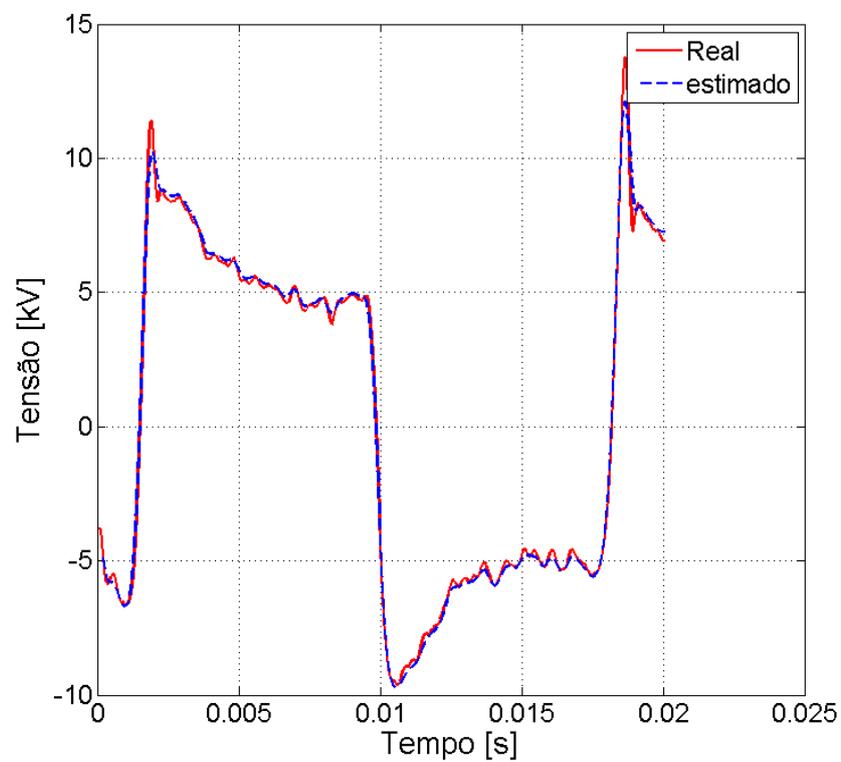


Figura 4.67: Tensão do arco dentro no ar-Mayr-Portela

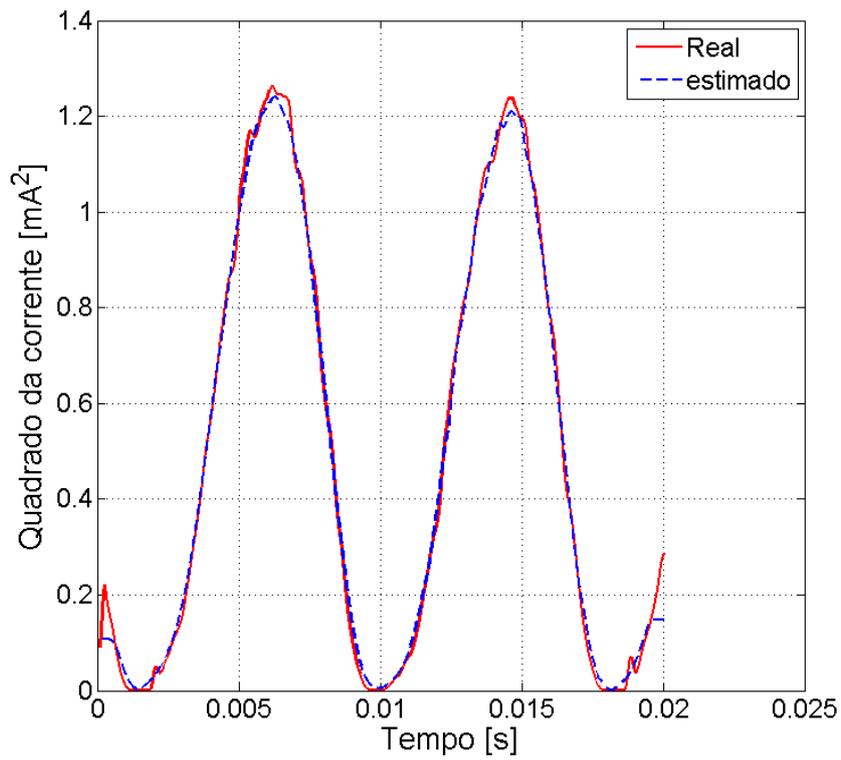


Figura 4.68: Quadrado da Corrente do arco no ar–Mayr-Portela

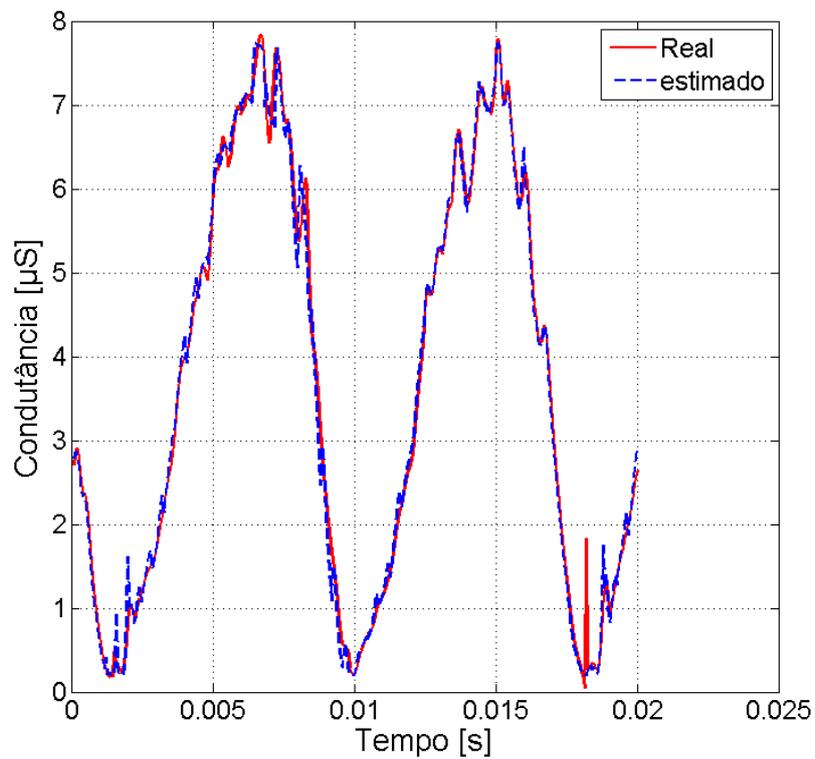


Figura 4.69: Condutância do arco no ar–Mayr-Portela

Os resultados de estimação dos parâmetros para o arco no ar para os casos de Thiel modificado e Mayr Portela são mostrados na tabela 4.14.

4.3.3 Discussão

Os resultados de estimação de parâmetros do arco elétrico com diferentes modelos de arco elétrico, mostram um bom desempenho do estimador. Os valores obtidos estão dentro dos valores sugeridos na literatura técnica [1].

Observamos que para distâncias mais curtas até e 2 cm o arco é mais estável, sendo assim, podemos manter o arco elevando a tensão sem ultrapassar a capacidade dos equipamentos utilizados nos testes.

Os valores dos parâmetros obtido para todos os casos de arco no ar variam pouco de um caso para outro como mostrado no Apêndice.

Os resultados nos indicam que o estimador tem um bom desempenho e que pode ser aplicado em todos os casos onde se tem arcos experimentais.

Dos resultados apresentados aqui podemos perceber que os modelos com melhor desempenho são os modelos de duas constantes de tempo. O modelo que melhor representa o arco elétrico é o modelo de Mayr-Portela, principalmente o modelo onde as “constantes de tempo” e a potência de resfriamento variam com a condutância.

Capítulo 5

Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros

Esta tese apresenta um procedimento de estimação estados parâmetros para a identificação do arco elétrico no ar ou dentro de disjuntores de potência. Foram considerados diferentes modelos para a representação do arco elétrico. Consideramos desde modelos com uma constante de tempo até modelos mais refinados utilizando duas constantes de tempo e sendo estas constantes variantes com a condutância do arco elétrico.

O procedimento de estimação é baseado no filtro de Kalman (FK) e no método da Máxima Verossimilhança. Um refinamento de Gauss-Newton foi implementado no estágio de Máxima Verossimilhança para melhorar o desempenho do estimador.

O primeiro passo foi aplicar o método de estimação em dados obtidos por simulação. Utilizando o simulink/Matlab implementamos o arco dentro de um disjuntor considerando os modelos de arco de Mayr e de Schwarz. Também foi implementado o modelo de Mayr-Portela no PSCAD/EMTDC com o objetivo de representar arco no ar. Ruído branco foi adicionado aos sinais de tensão e corrente para averiguar a robustez do procedimento aqui proposto. Os erros máximos encontrados foram abaixo de 4

O segundo passo foi obter dados experimentais. Para o caso de arco num disjuntor os dados foram obtidos de [52].

Para o caso do arco no ar, foi implementado no laboratório de Corona uma montagem experimental utilizando um espinterômetro com eletrodos especiais feitos

de uma ligação de tungstênio, elaborada para esse tipo de teste. Para os dois casos foram considerados os modelos de Mayr, Schwarz, Thiel Modificado e Mayr-Portela. Observamos que os modelos que representam melhor o arco elétrico são os modelos com duas constantes de tempo, e isso é válido para casos onde elas variam em função da condutância. O modelo que representa melhor o arco elétrico é o modelo de Mayr-Portela com os parâmetros variando em função da condutância. Esse modelo é representado matematicamente por dois sub-arcos interagindo entre si, sendo o que diferencia dos demais modelos. São consideradas duas constantes de tempo, sendo que uma representa os fenômenos rápidos e a outra os lentos.

Devido às limitações dos equipamentos utilizados, o arco é gerado com correntes baixas, menores de 80 mA, assim como o comprimento do arco é pequeno (até 5 cm). Contudo, os resultados mostraram que mesmo assim é possível avaliar o comportamento do arco de forma precisa.

Em todos os casos, tanto para o disjuntor como para o arco no ar, obtivemos bons resultados, quando comparados com os obtidos nos trabalhos anteriores. As condições iniciais foram determinadas levando em conta valores dos parâmetros encontradas na literatura; caso contrário poderiam ser obtidos valores absurdos de valores dos parâmetros do arco, ainda que do ponto de vista gráfico sejam melhores que para casos reais.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podemos mencionar alguns casos importantes:

- Análise mais detalhada do comportamento do arco experimental no ar, utilizando os mesmos dados obtidos na experiência;
- Implementar um programa que trabalhe com as condições iniciais, levando em conta valores conhecidos da literatura, juntamente com o programa principal de estimação proposto, de maneira a melhorar seu desempenho e que funcione automaticamente;
- Realizar testes em condições ambientais diversas, levando em conta a ação

do vento, e condições extremas de umidade, de maneira a se aproximar das condições reais.

- Realizar experiências envolvendo arcos longos, maiores de 1 m e levando em conta o impacto do ambiente no estabelecimento e extinção do arco;
- Avaliação mais completa da rede que alimenta o arco, para valores de frequências mais elevadas que as consideradas nesse trabalho, e concluir como seria o comportamento da interação arco-rede. Essa parte é de fundamental importância, já que a extinção do arco secundário é influenciada pelo comportamento de rede, como foi sugerido em [4].

Referências Bibliográficas

- [1] PORTELA, C. M. J. C., *Modelagem do arco electrico- algumas aplicações*, Tech. rep., COPPE/UFRJ, 1996.
- [2] PORTELA, C. M., SANTIAGO, N. H. C., OLIVEIRA, O. B., et al., “Modeling of Arc Extinction in Air Insulation”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan*, 1991.
- [3] TAVARES, M. C., PORTELA, C. M., “Transmission System Parameters Optimization-Analyzing Secondary Arc Current and Recovery Voltage”. In: *International Conference on Power Systems Transients*, 2003.
- [4] CÂMARA, A. S. B., *Extinção de Arco Secundário com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise*, Master’s Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.
- [5] CASSIE, A. M., *Theorie Nouvelle des Arcs de Rupture et de la Rigidité des Circuits*, Tech. rep., CIGRÉ, 1939.
- [6] MAYR, O., “Beitrage zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichtogens”, *Archiv für Elektrotechnik*, v. 37, pp. 558–608, 1943.
- [7] SCHAVEMAKER, P., SLUIS, L. V. D., “the arc model blockset”. In: *Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES) June 25-28, 2002, Crete, Greece*, 2002.
- [8] HABEDANK, U., “On the Mathematical Description of Arc Behaviour in the Vicinity of Current Zero”, *etzArchiv*, v. Bd. 10, H. 11, pp. 339–343, 1988.

- [9] JOHNS, A., AGGARWAL, R., SONG, Y., “Improved techniques for modelling fault arcs an faulted EHVtransmission systems”, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, v. 141, pp. 148 – 154, Mar 1994.
- [10] KIZILCAY, M., SETA, P. L., “Digital Simulation of Fault Arcs in Medium-Voltage Distribution Networks”. In: *15th PSCC, Liege*, 2005.
- [11] NAHI, N. E., *Estimation Theory and Applications*. John Wiley & Sons, 1969.
- [12] EYKHOFF, P., *System Identification: Parameter and State Estimation*. John Wiley & Sons, 1974.
- [13] STREJC, V., *State Space Theory of Discrete Linear Control*. John Wiley & Sons, 1981.
- [14] KALMAN, R. E., “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”, *Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering*, v. 1, pp. 35–45, March 1960.
- [15] WELCH, G., BISHOP, G., *An Introduction to the Kalman Filter*, Tech. rep., Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, July 2006.
- [16] BOSCO, J., DO AMARAL, W., *Sistemas estocásticos Lineares e Filtro de Kalman*, Tech. rep., Universidade Estadual de Campinas, Maio de 2004.
- [17] MAYBECK, P. S., *Stochastic Models, Estimation, and Control*. v. 1. Academic Press Inc, 1979.
- [18] SORENSON, H. W., “Least-Squares estimation: from Gauss to Kalman”, *IEEE Spectrum*, v. vol. 7, pp. 63–68, July 1970.
- [19] BROWN, R. G., HWANG, P. Y. C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [20] MOHINDER, G. S., ANDREWS, P. A., *Kalman Filtering Theory and Practice*. Upper Saddle River, NJ USA, Prentice Hall, 1993.

- [21] JACOBS, O. L. R., *Introduction to Control Theory, 2nd Edition*. Oxford University Press, 1993.
- [22] LEWIS, R., *Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory*. John Wiley & Sons, Inc., 1986.
- [23] CRASSIDIS, J. L., JUNKINS, J. L., *Optimal Estimation of Dynamic Systems*. Chapman & Hall/Crc, 2004.
- [24] GHAHRAMANI, Z., HINTON, G. E., *Parameter estimation for linear dynamical system*, Tech. rep., Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto, 1996.
- [25] GAUSS, K. G., *Theory of Motion of the Heavenly Bodies*. Dover: New York, 1963.
- [26] AGUIRRE, L. A., *Introduction to system identification, 2nd ed [Em Português]*. Editora UFMG, 2004.
- [27] ASTROM, K., “Maximum likelihood and prediction error methods”, *Automatica*, v. vol. 17, pp. 551–574, Sept. 1980.
- [28] BERGBOER, N., VERDULT, V., VERHAEGEN, M. H. G., “An Efficient Implementation of Maximum Likelihood Identification of LTI State-Space Models by Local Gradient Search”. In: *Proceeding of the 41o Conference on Decision&Control. USA*, December 2002.
- [29] MORÉ, J. J., “The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory”, chap. 6, Springer Verlag, 1978.
- [30] DAVID, B., BASTIN, G., “A Maximum Likelihood ‘Parameter Estimation Method for Nonlinear Dynamical Systems”. In: *Proceeding of the 38o Conference on Decision&Control. USA*, December 1999.
- [31] BIERMAN, G. J., BELZER, M. R., VANDERGRAFT, J. S., “Maximum Likelihood Estimation Using Square Root Information Filters”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 35, n. 12, pp. 1293–1298, December 1990.

- [32] SHUMWAY, R. H., STOFFER, D. S., “Dynamic Linear Models With Switching”, *Journal of the American Statistical Association*, v. Vol. 86, pp. 763–769, Sep., 1991.
- [33] KIM, C. J., “Dynamic Linear Models with Markov-Switching”, *J. Econometrics*, v. 60, pp. 1–22, 1994.
- [34] DENG, L., SHEN, X., “Maximum likelihood in statistical estimation of dynamic systems: decomposition algorithm and simulation results”, *Signal Process 57*, v. 57, pp. 65–79, February 1997.
- [35] SCHWARZ, J., “Dynamisches Verhalten eines Gasbeblasenen, Turbulenzbestimmten Schaltlichtbogens”, *ETZ-A, Bd. 92*, v. 1, pp. 389–391, 1971.
- [36] DER SLUIS, L. V., RUTGERS, W., KOREMAN, C. G. A., “A Physical Arc Model for the Simulation of Current Zero Behaviour of High-Voltage Circuit Breakers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. Vol. 7, No. 2, pp. 1016–1022, 1992,.
- [37] SMEETS, R. P. P., KERTÉSZ, V., “Evaluation of High-Voltage Circuit Breaker Performance with a New Validated Arc Model”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, v. Vol. 147, No. 2, pp. 121–125, March 2000.
- [38] SCHAVEMAKER, P. H., DER SLUIS, L. V., DE LANGE, A. J. P., “Circuit Breaker Arc Model Computations for Critical Line Length Determination2”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 2, pp. 915–920, 2000.
- [39] BIZJAK, P. Z. G., ZUNKO, P., POVH, D., “Combined Model of SF6 circuit Breaker for Digital Programs”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, pp. 174–180, March 2003.
- [40] NITU, S., NITU, C., ANGHELITA, P., “Electric Arc Model, for High Power Interrupters”. In: *Eurocon 2005., Serbia & Montenegro, Belgrado*, 2005.
- [41] MARTINEZ, J. A., MAHSEREDJIAN, J., KHODABAKHCHIAN, B., “Parameter determination for modeling system transients-Part VI: Circuit breakers”, *Power Delivery, IEEE Transactions*, v. 20, n. 3, pp. 2079–2085, July 2005.

- [42] ET.AL., A. V. A., “Some problems of EHV and UHV Air-Blast Circuit Breakers”. In: *in CIGRÉ 1980 Session. Paper 13-04*, 1980.
- [43] HABEDANK, U., “Application of a new arc model for the evaluation of short-circuit breaking tests”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 4, pp. 1921–1925, Oct. 1993.
- [44] HABEDANK, U., “Improved evaluation of short circuit breaking tests”, *Report at the Colloquium of CIGRE SC 13*, v. 13, May 1989.
- [45] ABBAOUI, M., CHEMINAT, B., “Determination of the characteristics of an electric arc plasma contaminated by vapors from insulators”, *IEEE Transactions On Plasma Science*, v. 19, n. 1, pp. 1–8, Feb. 1991.
- [46] SWANSON, B. W., ROIDT, R. M., BROWNE, T. E., “Arc Cooling and Short Line Fault Interruption”, *Power Apparatus and Systems, IEEE transactions on*, v. 1, n. 3, pp. 1094–1102, May 1971.
- [47] CARVALHO, A., PORTELA, C., LACORTE, M., et al., “Disjuntores e Chaves, Aplicação em Sistemas de Potencia”. In: *CIGRE-FURNAS-Rio de Janeiro-Brazil*, 1995.
- [48] NAKANISHI, K., *Switching Phenomena in High-Voltage Circuit*. Marcel Dekker -Technology & Industrial Arts, 1991.
- [49] GARZON, R. D., *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*. Marcel Dekker -Technology & Industrial Arts, 2002.
- [50] GIMÉNEZ, W., HEVIA, O., “Method to Determine the parameter of electric arc from test data”. In: *in Proc. International Power System s Transients Conference (IPST)*, 1999.
- [51] ORAMA-EXCLUSA, L. R., RODRIGUEZ-MEDINA, B., “Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations”. In: *International Conference on Power Systems Transients*, 2003.
- [52] DUPONT, C. J., *Modelagem Determinística de Arco Elétrico*, Master’s Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.

- [53] PRIKLER, L., KIZILCAY, M., BÁN, G., et al., “Modeling Secondary Arc Based on Identification of Arc Parameters from Staged Fault Test Records”, *Electrical Power and Energy System*, v. 25, pp. 581–589, 2003.
- [54] PRIKLER, L., KIZILCAY, M., BÁN, G., et al., “Improved Secondary Arc Models Based on Identification of Arc Parameters from Staged Fault Test Records”. In: *14th PSCC, Sevilla*, 2002.
- [55] DE OLIVEIRA FILHO, O. B., *Modelagem de Arco Elétrico- Parte Experimental*, Master’s Thesis, Universidade Federal de Rio de Janeiro, 1991.
- [56] MEGAHEHED, A. I., JABR, H. M., ABOUELENIN, F. M., et al., “Arc Characteristics and a Single-Pole Auto-Reclosure Scheme for Alexandria HV Transmission System”, *Electric Power Systems Research*, v. vol. 76, pp. 663–670, 2006.
- [57] MAMIS, M. S., MERAL, M. E., “State-space modeling and analysis of fault arcs”, *Electric Power Systems Research*, v. 2, pp. 46–51, April 2005.
- [58] STENGEL, R. F., *Optimal Control and Estimation*. Dover Publications, Inc: New York., 1994.
- [59] SAKAKIBARA, T., KITO, Y., MIYACHI, I., “The Voltage Gradient of the Stabilized Arc Column in High-Pressure SF6 Gas”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v. 7, pp. 1975–1982, 1974.
- [60] ANDERSON, B. D. O., *Optimal filtering*. Prentice-Hall: Englewood Cliff, NJ., 1979.
- [61] BIZJAK, P. Z. G., DUSAN, P., “Circuit Breaker Model For Digital Simulation Based On Mayr’s And Cassie’s Differential Arc Equations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, pp. 1310–1315, July 1995.
- [62] CASTI, J. L., *Nonlinear System Theory*. Academic Press, 1985.
- [63] DARWISH, H. A., ELKALASHY, N. I., “Universal Arc Representation Using EMTP”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, pp. 772– 779, April 2005.

- [64] DARWISH, H. A., ELKALASHY, N. I., “Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-In Model”. In: *International Conference on Power Systems Transients*, 2003.
- [65] DESCHRIJVER, D., MROZOWSKI, M., DHAENE, T., et al., “Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 18, pp. 383–385, June 2008.
- [66] DMITRIEV, M. V., EVDOKUNIN, G. A., GAMILKO, V., “EMTP Simulation of the Secondary Arc Extinction at Overhead Transmission Lines under Single Phase Automatic Reclosing”, *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, v. 15, pp. 1–6, 2005.
- [67] ELKALASHY, N. I., DARWISH, H. A., TAALAB, A.-M. I., et al., “An Adaptive Single Pole Autoreclosure Based on Zero Sequence Power”, *Electric Power Systems Research*, v. vol. 77, pp. 438–446, 2007.
- [68] GELB, A., *Applied Optimal Estimation*. MIT Press: Cambridge, MA, 1974.
- [69] GLINKOWSKI, M., TAKANASHI, K., (eds), *Parameter Optimization of Cassie-Mayer Equation for SF6 Arc Modeling*, November 1996.
- [70] GOLSHAN, M. E. H., GOLBON, N., “Detecting Secondary Arc Extinction Time by Analysing Low Frequency Components of Faulted Phase Voltage or Sound Phase Current Waveforms”, *Electrical Engineering*, v. vol. 66, pp. 141–148, 2005.
- [71] GUSTAVSEN, B., “Improving the pole relocating properties of vector fitting”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 21, pp. 1587–1592, July 2006.
- [72] GUSTAVSEN, B., SEMLYEN, A., “Rational approximation of frequency domain responses by Vector Fitting”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 14, pp. 1052–1061, July 1999.
- [73] HASTINGS-JAMES, R., SAGE, I. W., “Recursive generalized least-squares procedure for on-line identification of process parameters”, *Proc. Inst. Elec. Eng.*, v. vol. 116, pp. 2057–2062, 1969.

- [74] JR., J. E. D., SCHNABEL, R. B., “Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations”. In: *in Proceedings of SIAM. Philadelphia, PA: SIAM*, 1996.
- [75] LEUNG, S. Y., SNIDER, L. A., WONG, C. S. M., “SF6 Generator Circuit Breaker Model”. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)- Montreal*, 2005.
- [76] LJUNG, L., *System Identification: Theory for the User*. Prentice-Hall, 1987.
- [77] PLEITE, J., OLIAS, E., BARRADO, A., et al., “Modeling the transformer Frequency Response to Develop Advanced Maintenance Techniques”, *14th PSCC, Sevilla*, v. session 13, pp. 1–6, 24-28 June 2002.
- [78] RAMÍREZ, C., CALVA, P. A., “Simulation of Electric Power Circuit Breakers in the EMTP Incorporating Electric Arc Models: Application to Reactor Bank Switching and Short Line Fault”. In: *2001 Annual report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2001.
- [79] RYAN, H. M., JONES, G. R., *SF6 Switchgear*. Peter Peregrinus Ltd, 1989.
- [80] SAGE, A. P., MELSA, J. L., *System Identification*. Academic Press, 1971.
- [81] SANATHANAN, C., KOERNER, J., “Transfer function synthesis as a ratio of two complex polynomials”, *IEEE Trans. Autom. Control*, v. AC-8, pp. 56–58, Jan. 1963.
- [82] SCHAVEMAKER, P. H., “An Improved Mayr-Type arc Model Based on Current-Zero Measurement”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. Vol. 14, no.2, pp. 580–584, 2000.
- [83] SEMLYEN, A., DABULEANU, A., “A System Approach To Accurate Switching Transient Calculations Based On State Variable Component Modeling”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 94, n. 2, pp. 572– 578, MarchIAprfl 1975.
- [84] TERZIJA, V., KOGLIN, H.-J., “Long arc in free air: laboratory testing, modeling, simulation and model-parameters estimation”, *iee*, v. 149, pp. 318–324, 2002.

- [85] THOMAS, D. W. P., PEREIRA, E. T., CHRISTOPOULOS, C., et al.,
“The Simulation of Circuit Breaker Switching Using a Composite Cassie-
Modified Mayr Model”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10,
n. 4, pp. 1829–1835, October 1995.

Apêndice A

Modelos de Sistemas Dinâmicos

A teoria de estimação, em geral é baseada em modelos caixa branca, caixa cinzenta e caixa preta. Portanto, Assim, a necessidade de um modelo apropriado é imperativa. Entendemos como apropriado um modelo que seja bem adaptado para um objetivo determinado. Em outras palavras, o modelo deve ser definido a partir da finalidade a que se destina. O modelo deve descrever as propriedades essenciais do sistema subjacente, mas deve também ser simples o suficiente para se certificar que ele pode ser usado para desenvolver um algoritmo de estimação eficiente. Sem um modelo adequado, o processo de estimação será impreciso. Quando nos referimos a um modelo, nos referimos a um sistema de equações descrevendo a evolução dos estados e das aferições associadas.

A.1 Revisão da teoria de sistemas lineares

Focalizaremos nos sistemas contínuos lineares invariantes no tempo caracterizado por

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{A.1}$$

onde $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ é o estado do sistema, $u(t) \in \mathfrak{R}^m$ é a entrada do sistema, $y(t) \in \mathfrak{R}^p$ é a saída do sistema e A é a matriz de estado o da planta de tamanho $n \times n$, B é a matriz de controle ou da entrada $n \times m$, e C é a matriz de saída de tamanho $n \times p$ e D é a matriz que define a proporção da entrada que aparece diretamente na saída de tamanho $m \times p$.

A.1.1 Método de Discretização

Com o advento dos computadores digitais, Sistemas de tempo discreto se tornaram padrão na maioria das aplicações dinâmicas. O mecanismo que age sobre a saída dos sensores e fornece números ao computador digital é o conversor analógico-digital (A/D). Então, os números são processados através de sub-rotinas numéricas e enviados ao conversor analógico-digital (A/D). Isto permite a utilização efetiva de controles digitais. Existem vários métodos de discretização conhecidos na literatura, mas nesse trabalho vamos falar com mais detalhe em apenas dois métodos, conforme mostra um dos apêndices do presente documento.

A.2 Sistemas Não Lineares

Consideramos a circunstância em que o sistema a ser analisado é não linear e pode ser descrito por

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(t, x, u) \\ y &= h(t, x, u)\end{aligned}\tag{A.2}$$

Alguns destes sistemas podem ser encontrados em aplicações práticas e podem ser resolvidos por uma soluções analíticas. Infelizmente, no caso de aplicações em Sistemas de Energia Elétrica não se encontram soluções fechadas e/ou analíticas. Uma opção é após (ou até mesmo antes) a discretização do sistema realizar uma linearização em torno de um ponto de operação e utilizar as ferramentas para sistemas lineares. Para discretizar o sistema pode ser utilizado qualquer dos dois métodos mencionados nos Apêndices.

A.3 Estimação de Sistemas Não Lineares

O problema de estimação de parâmetros ou estados de um sistema não linear é um bastante complicado e não necessariamente solucionável para o caso geral. A necessidade prática de resolver esses problemas tem originado um grande número de idéias e procedimentos. Alguns nada mais são que uma filosofia de aproximação a um procedimento que conduz a derivação de estimadores práticos. Há alguns procedimentos que atacam um problema específico e resulta em estimadores úteis,

porém de difícil generalização. Uma contrapartida é a utilização direta de rotinas computacionais e aplicação direta de aproximações numéricas. Por exemplo, para aplicar os métodos de estimação lineares temos a necessidade de linearizar o sistema em torno de um ponto de operação

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(t, x, u) \\ y &= h(t, x, u)\end{aligned}\tag{A.3}$$

Para discretizar o sistema pode ser utilizado qualquer dos dois métodos mencionados nesse documento. Uma vez discretizado e linearizado, obtemos:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t) \\ y(t) &= C(t)x(t) + D(t)u(t)\end{aligned}\tag{A.4}$$

Depois disso, são aplicados os mesmos métodos de estimação para sistemas lineares.

Apêndice B

Máxima Verossimilhança

Visando desenvolver um procedimento para estimativa dos parâmetros no modelo de espaço de estado definido pela equação (2.14), podemos notar que o logaritmo da probabilidade comum de $x = [x_0, x_1, \dots, x_N]$, $y = [y_0, y_1, \dots, y_N]$ pode ser escrito na forma:

$$\begin{aligned} \log V(\theta) = & \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [y_t - Cx_t]' R^{-1} [y_t - Cx_t] + \\ & \frac{T}{2} \log(R) + \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T [x_t - Ax_{t-1} - Bu_{t-1}]' R^{-1} [x_t - Ax_{t-1} - Bu_{t-1}] \\ & + \frac{T-1}{2} \log(Q) + \frac{1}{2} [x_1 - \pi_1]' V_1^{-1} [x_1 - \pi_1] + \frac{1}{2} \log(V_1) \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

onde, R é a matriz de covariância do erro de saída, Q é a matriz de covariância do erro processo; V_1 é a matriz de covariância do estado, Π é a média de x .

Resolvendo o sistema de temos:

$$[A \quad B] = \left[\sum_{t=1}^N x_t x'_{t-1} \quad \sum_{t=1}^N x_t \right] \left[\sum_{t=1}^N x_{t-1} x'_{t-1} \quad \sum_{t=1}^N x'_{t-1}; \sum_{t=1}^N x_t x'_{t-1} \quad u_{t-1} \right]^{-1} \quad (\text{B.2})$$

$$[C] = \left[\sum_{t=0}^N y_t x'_t \right] \left[\sum_{t=0}^N x_t x'_t \right]^{-1} \quad (\text{B.3})$$

$$Q = \frac{1}{N} \left[\sum_{t=1}^N x_t x'_t - [A \quad B] \left[x_t x'_{t-1} \quad x_t \right]' \right] \quad (\text{B.4})$$

$$R = \frac{1}{N+1} \left[\sum_{t=0}^N y_t y'_t - [C] \sum_{t=0}^N \left[y_t x'_t \right]' \right] \quad (\text{B.5})$$

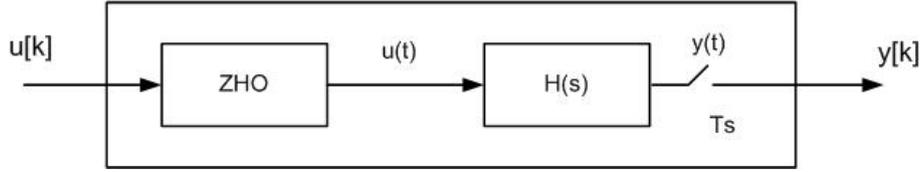


Figura B.1: Conversor Analógico-Digital

B.1 Rotina de Otimização

O método de Gauss-Newton é um procedimento para resolver problemas de mínimos quadrados não lineares. Relaciona a matriz Hessiana e a Gradiente de uma função para minimização da função custo.

Considerando o erro de estimação da saída representado por $e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$, a função custo é dado por:

$$V(\hat{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N [e^T(k, \hat{\theta})e(k, \hat{\theta})] \quad (\text{B.6})$$

onde $\hat{\theta}$ contem os parâmetros $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ e $D(t)$. Tendo a função custo, calculamos a matriz Hessiana H e o vetor gradiente G como

$$H = \frac{\partial^2 V(\hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}^2} \quad G = \frac{\partial V(\hat{\theta})}{\partial \hat{\theta}} \quad (\text{B.7})$$

O parâmetro $\hat{\theta}$ é atualizado através de um processo iterativo como mostra a (B.7) até não haver mudanças significativas em segue $\hat{\theta}$.

$$\hat{\theta}_{new} = \hat{\theta}_{old} - H^{-1}G \quad (\text{B.8})$$

B.2 Métodos de Discretização

B.2.1 Método de Zero-Order Hold

Vamos apenas considerar o sistema amostral mais simples dado por “zero-order hold”, que mantém o ponto amostrado como um valor constante através de todo o intervalo. A Fig. B.1 demonstra um sinal amostral usando um “zero-order hold”. Obviamente A medida que o intervalo da amostra cai, o sinal amostral se aproxima cada vez mais do sinal contínuo.

Dado um sistema na forma da equação (A.1) e considerando o caso onde o tempo é ajustado a um primeiro intervalo de tempo, denotado por Δt , $A(t)$ e $B(t)$ são constantes. Então, temos

$$x(\Delta t) = e^{A\Delta t}x(0) + \left[\int_0^{\Delta t} e^{A(\Delta t-\tau)} d\tau \right] Bu(0) \quad (\text{B.9})$$

Integrando-se o lado esquerdo da equação acima podemos simplificar definindo $\zeta = \Delta t - \tau$ o qual conduz a equação (B.10)

$$\int_0^{\Delta t} e^{A(\Delta t-\tau)} d\tau = - \int_{\Delta t}^0 e^{A\zeta} d\zeta = \int_0^{\Delta t} e^{A\zeta} d\zeta \quad (\text{B.10})$$

e a eq. (B.9) torna-se

$$x(\Delta t) = \Phi x(0) + \Gamma u(0) \quad (\text{B.11})$$

onde

$$\begin{aligned} \Phi &\equiv e^{A\Delta t} \\ \Gamma &\equiv \left[\int_0^{\Delta t} e^{At} dt \right] B \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Expandindo para $k + 1$ amostras, temos

$$x[(k + 1)\Delta t] = \Phi x(k\Delta t) + \Gamma u(k\Delta t) \quad (\text{B.13})$$

onde a representação de espaço de estado é dada pela eq. (B.13).

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi x_k + \Gamma u_k \\ y_k &= Cx_k + Du_k \end{aligned} \quad (\text{B.14})$$

Podemos notar que as matrizes de saída do sistema, C e D não são afetadas pela conversão ao sistema de tempo discreto. Um caso particular, utilizando o método descrito para casos onde A e B são constantes, teríamos:

$$\begin{aligned} \Phi &= e^{A\Delta t} \\ \Gamma &= \int_0^{\Delta t} be^{At} dt = \frac{B}{A}(e^{A\Delta t} - 1) \end{aligned} \quad (\text{B.15})$$