

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Leandro do Nascimento

**Estimação dos parâmetros do gerador síncrono através
do teste de rejeição de carga usando medidas obtidas em
ensaios em laboratório**

São Carlos

2019

Leandro do Nascimento

**Estimação dos parâmetros do gerador síncrono através
do teste de rejeição de carga usando medidas obtidas em
ensaios em laboratório**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

**São Carlos
2019**

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

N244e Nascimento, Leandro do
Estimação dos parâmetros do gerador síncrono
através do teste de rejeição de carga usando medidas
obtidas em ensaios em laboratório / Leandro do
Nascimento; orientador Elmer Pablo Tito Cari. São
Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.

1. Estimação de parâmetros. 2. Gerador
síncrono. 3. Rejeição de Carga. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Leandro do Nascimento

Título: "Estimação dos parâmetros do gerador síncrono através do teste de rejeição de carga usando medidas obtidas em ensaios em laboratório"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 14 / 06 / 2019,

com NOTA 8,9 (oito , nove), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - Orientador - SEL/EESC/USP

Mestre Taylon Gomes Landgraf - Doutorando - SEL/EESC/USP

Dr. Alexandre Prodossimo Sohn - SEL/EESC/USP

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

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meus pais, José Antônio e Elza, por sempre me apoiarem em minhas decisões, desde quando decidi entrar na USP, passando por 5 longos anos de cursinho, até o momento em que eu sai do meu trabalho para somente estudar. Eles nunca me deixaram desistir da luta que foi passar no vestibular.

Ao meu irmão Leonardo, que me ajudou e aprendeu junto comigo todas as disciplinas da faculdade que pôde, mesmo sem estar cursando-as. Ele foi e ainda é meu parceiro que me auxilia a resolver vários problemas de elétrica, física e de computação.

Aos meus amigos em todos esses anos de universidade. Em especial aos meus amigos que conheci no alojamento da USP São Carlos, e que juntos montamos a "República Arrocha", hoje uma grande família. Juntos passamos muitos momentos felizes que foram essências para toda minha trajetória no curso de graduação.

À minha namorada Jessica, que conheci nos meus últimos anos de faculdade e me deu todo o carinho possível, me fez uma pessoa diferente e me deu forças pra encarar a reta final até meu diploma, me incentivando sempre.

Ao professor Elmer por toda atenção que me deu como professor e como amigo.

À Universidade de São Paulo, por me oferecer uma excelente qualidade de ensino, ambiente de estudo cheio de oportunidades e infraestrutura, que foram ímpares para minha formação.

Demore o tempo que for para decidir o que você quer da vida, e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto, porque o mundo tentará te dissuadir.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

NASCIMENTO, L. **Estimação dos parâmetros do gerador síncrono através do teste de rejeição de carga usando medidas obtidas em ensaios em laboratório.** 2019. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Neste trabalho são estimados os parâmetros dinâmicos padronizados de um gerador síncrono via método de rejeição de carga. Os testes foram realizados no modo *off-line* dentro do Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Por meio de um sistema implementado neste laboratório, onde uma máquina de corrente contínua aplica um movimento de rotação à um gerador síncrono, foram coletados dados através de kits de condicionamento de sinais e d *software* LabVIEW[®], da *National Instruments*. Os dados obtidos foram tratados com o *software* MATLAB[®], da *MathWorks*, e por meio de uma metodologia analítica de redução à logaritmo natural foram estimados os valores dos parâmetros do eixo direto em pu. Por fim, estes parâmetros foram otimizados via algoritmo de sensibilidade de trajetória. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois apenas um dos parâmetros não foi devidamente estimado, devido às dificuldades de estimação encontradas quando trabalha-se com geradores de baixa potência.

Palavras-chave: Estimação de parâmetros, Gerador síncrono, Rejeição de Carga.

ABSTRACT

NASCIMENTO, L. **Synchronous generator parameter estimation through the load rejection test data using measurements obtained in laboratory testes.** 2019. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

In this work the dynamic parameters of a generator were calculated using the load rejection method. The tests were performed in offline mode in the TCC Laboratory in Electrical Machines of the School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo. Through a monitored system, data were collected through signal conditioning kits and using the software LabVIEW National Instruments Company. The data obtained were treated with the software MATLAB of MathWorks Company, and by means of an analytical methodology for reducing the logarithm of direct axis parameters data in pu. Finally, these parameters were optimized via path-sensitivity algorithm. The results obtained were satisfactory, since only one of the parameters was not properly estimated, due to the difficulties of estimation found when working with low power generators.

Keywords: Parameter estimation, Synchronous generator, Load rejection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotor de uma máquina síncrona	29
Figura 2 – Estator de uma máquina síncrona	30
Figura 3 – Sistema de referência da máquina síncrona	31
Figura 4 – Circuito equivalente do eixo direto	32
Figura 5 – Circuito equivalente do eixo em quadratura	32
Figura 6 – Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória	39
Figura 7 – Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória aplicado à rejeição de carga do eixo direto	40
Figura 8 – Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória aplicado a rejeição de carga do eixo arbitrário	41
Figura 9 – Esquemático de rejeição do eixo direto	44
Figura 10 – Diagrama fasorial após a rejeição de carga do eixo direto	45
Figura 11 – Curva da envoltória da tensão terminal após a rejeição de carga do eixo direto	46
Figura 12 – Envoltória da tensão terminal sem a componente de regime permanente em escala semi logaritmica	47
Figura 13 – Envoltória da tensão terminal do subtransitório em escala semi logaritmica	48
Figura 14 – Diagrama fasorial da rejeição de carga do eixo em quadratura	49
Figura 15 – Envoltória da tensão de armadura na rejeição de carga do eixo em quadratura	50
Figura 16 – Esquemático de rejeição do eixo arbitrário	50
Figura 17 – Diagrama fasorial da rejeição de carga do eixo arbitrário	51
Figura 18 – Tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto	55
Figura 19 – Envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto	55
Figura 20 – União das envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto	56
Figura 21 – Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente	57
Figura 22 – Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica	57
Figura 23 – Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica e ampliação de 0 até 1s	58
Figura 24 – Melhor reta sobre o regime transitório	59
Figura 25 – Curva da tensão no regime subtransitório da rejeição do eixo direto . .	60

Figura 26 – Melhor reta sobre o regime subtransitório	61
Figura 27 – Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo direto	62
Figura 28 – Tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo em quadratura	64
Figura 29 – União das envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo arbitrário	64
Figura 30 – Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo arbitrário	65
Figura 31 – Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo arbitrário	67
Figura 32 – Foto da bancada do Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas composta por uma máquina de corrente contínua e um gerador síncrono	68
Figura 33 – Esquemático unifilar do Laboratório de TCC em Máquinas da EESC-USP	69
Figura 34 – Esquemático de rejeição do eixo direto do ensaio prático	71
Figura 35 – Tensão de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo direto	71
Figura 36 – Corrente de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo direto	72
Figura 37 – Envoltórias das tensão medida de cada fase após a rejeição do eixo direto	72
Figura 38 – Média das envoltórias de tensão medidas das três fases das tensão após a rejeição do eixo direto (em V)	73
Figura 39 – Média das envoltórias das tensões das três fases após a rejeição do eixo direto (em pu)	74
Figura 40 – Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente	75
Figura 41 – Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica	76
Figura 42 – Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica de 0 até 0,091s	76
Figura 43 – Melhor reta sobre o regime transitório real	77
Figura 44 – Curva da tensão medida no regime subtransitório da rejeição do eixo direto	78
Figura 45 – Melhor reta sobre o regime subtransitório real	79
Figura 46 – Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo direto	80
Figura 47 – Esquemático de rejeição do eixo arbitrário do ensaio prático	82
Figura 48 – Tensão de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo arbitrário	82

Figura 49 – Corrente de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo arbitrário	83
Figura 50 – Envolvórias das tensões medidas em cada fase após a rejeição do eixo arbitrario	83
Figura 51 – Média das envoltórias das tensões medidas das três fases após a rejeição do eixo arbitrário (em V)	84
Figura 52 – Média das envoltórias das três fases das tensão após a rejeição do eixo arbitrário (em pu)	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características nominais do gerador simulado	53
Tabela 2 – Valores base do gerador simulado	53
Tabela 3 – Parâmetros dinâmicos reais do gerador simulado	54
Tabela 4 – Valores simulados imediatamente antes da rejeição do eixo direto . . .	54
Tabela 5 – Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo direto	62
Tabela 6 – Parâmetros finais da estimação do eixo direto comparados com os reais	63
Tabela 7 – Valores simulados imediatamente antes da rejeição do eixo arbitrário .	63
Tabela 8 – Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo em quadratura	67
Tabela 9 – Parâmetros finais da estimação do eixo em quadratura comparados com os reais	68
Tabela 10 – Características nominais do gerador real	70
Tabela 11 – Características nominais do gerador real	70
Tabela 12 – Valores medidos imediatamente antes da rejeição do eixo direto	70
Tabela 13 – Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo direto	80
Tabela 14 – Parâmetros finais da estimação do eixo direto comparados com os parâmetros já conhecidos do gerador	81
Tabela 15 – Valores medidos imediatamente antes da rejeição do eixo arbitrário . .	81

LISTA DE SÍMBOLOS

$d - q$	Eixos direto e em quadratura
$Re - Im$	Eixos real e imaginário (referência síncrona)
V_t	Tensão terminal de armadura
δ	Ângulo do eixo de quadratura em relação à referência síncrona
θ	Ângulo da tensão terminal em relação à referência síncrona
β	Ângulo de carga
ϕ	Ângulo do fator de potência
ω	Velocidade angular
t	Tempo
E	Tensão gerada
$U \quad U_0$	Tensão de armadura e a tensão imediatamente antes da rejeição
I_0	Corrente imediatamente antes da rejeição
P_0	Potência ativa imediatamente antes da rejeição
Q_0	Potência reativa imediatamente antes da rejeição
I_b	Corrente base
S_b	Potência base
U_b	Tensão base
S_N	Potência trifásica nominal
U_N	Tensão de linha nominal
I_N	Corrente de linha nominal
V_{campo}	Tensão de campo nominal
I_{campo}	Corrente de campo nominal
Z_b	Impedância base
X_d	Reatância síncrona do eixo direto

X'_d	Reatância transitória do eixo direto
X''_d	Reatância subtransitória do eixo direto
X_q	Reatância síncrona do eixo em quadratura
X'_q	Reatância transitória do eixo em quadratura
X''_q	Reatância subtransitória do eixo em quadratura
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto
T''_{d0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto
T'_{q0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura
T''_{q0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura
$u_a \ u_b \ u_c$	Tensão de armadura das fases a, b e c
u_{d0}	Tensão no eixo direto antes da rejeição
u_{q0}	Tensão no eixo em quadratura antes da rejeição
i_d	Corrente no eixo direto
i_q	Corrente no eixo em quadratura
i_{d0}	Corrente no eixo direto imediatamente antes da rejeição
i_{q0}	Corrente no eixo em quadratura imediatamente antes da rejeição
ψ_d	Fluxo concatenado no eixo direto
ψ_q	Fluxo concatenado no eixo em quadratura
$\Delta\psi_{d0}$	Variação do fluxo concatenado no eixo direto antes da rejeição
$\Delta\psi_{q0}$	Variação do fluxo concatenado no eixo em quadratura antes da rejeição
ψ_{d0}	Fluxo concatenado no eixo direto antes da rejeição
ψ_{q0}	Fluxo concatenado no eixo em quadratura antes da rejeição
r	Resistência de armadura
r_f	Resistência de campo
X_f	Reatância de campo
e_{fd}	Tensão de campo

i_{fd}	Corrente de campo
i_{kd}	Corrente do enrolamento amortecedor do eixo direto
i_{kq}	Corrente do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura
X_1	Reatância de dispersão de armadura
R_{1d}	Resistência de dispersão do eixo direto
R_{1q}	Resistência de dispersão do eixo em quadratura
X_{1d}	Reatância de dispersão do eixo direto
X_{1q}	Reatância de dispersão do eixo de quadratura
X_{ad}	Reatância mútua do eixo direto
X_{aq}	Reatância mútua do eixo de quadratura
y_m	Saída medida do sistema real
y	Saída do modelo matemático
p	Parâmetro ou vetor de parâmetros
p_0	Estimativa inicial ou vetor de estimativas iniciais
N	Número de amostras
t_{final}	Tempo final
$t_{inicial}$	Tempo inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivos	27
1.2	Estrutura	27
2	MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA	29
2.1	Máquinas CA	29
2.1.1	Composição da máquina síncrona	29
2.1.2	Parâmetros primitivos	30
2.1.3	Parâmetros derivados	31
2.1.4	Modelagem da máquina síncrona para rejeição de carga	32
2.1.4.1	Regime permanente	33
2.1.4.2	Regime transitório	34
2.1.4.3	Descrição da rejeição de carga	35
3	MÉTODO DE SENSIBILIDADE DE TRAJETÓRIA	37
3.1	Estimação de parâmetros	37
3.2	Procedimentos de estimação via método de sensibilidade de trajetória	37
3.2.1	Cálculo do erro funcional $J(p)$	37
3.2.2	Cálculo da sensibilidade $\frac{\partial y}{\partial p}$	38
3.2.3	Cálculo de $G(p)$ e $\Gamma(p)$	38
3.2.4	Cálculo do vetor Δp de ajustes dos parâmetros	38
3.3	Método de sensibilidade de trajetória aplicado à estimação de parâmetros via teste de rejeição de carga em máquinas síncronas	39
3.3.1	Método aplicado ao ensaio de rejeição do eixo direto	39
3.3.2	Método aplicado ao ensaio de rejeição do eixo arbitrário	40
4	PROCEDIMENTO DE ESTIMAR PARÂMETROS POR MÉTODO ANALÍTICO (GRÁFICO) UTILIZANDO TESTE DE REJEIÇÃO DE CARGA	43
4.1	Ensaio de rejeição de carga do eixo direto	43
4.1.1	Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d	46
4.1.2	Cálculo da reatância transitória do eixo direto X'_d e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T'_{d0}	46
4.1.3	Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X''_d e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T''_{d0}	47
4.2	Ensaio de rejeição de carga do eixo em quadratura	48

4.2.1	Cálculo da reatância síncrona do eixo em quadratura X_q e da reatância subtransitória do eixo em quadratura X_q''	49
4.3	Ensaio de rejeição de carga do eixo arbitrário	50
4.3.1	Cálculo dos parâmetros	51
4.3.1.1	Cálculo da constante de tempo subtransitória da eixo em quadratura T_{q0}''	52
5	APLICAÇÃO	53
5.1	Testes com dados simulados	53
5.1.1	Ensaio de rejeição do eixo direto	54
5.1.1.1	Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d	56
5.1.1.2	Cálculo da reatância transitória do eixo direto X_d' e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T_{d0}'	56
5.1.1.3	Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X_d'' e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T_{d0}''	60
5.1.1.4	Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo direto	61
5.1.2	Ensaio de rejeição do eixo em quadratura	63
5.1.3	Ensaio de rejeição do eixo arbitrário	63
5.1.3.1	Cálculo do valor aproximado do ângulo de carga β	65
5.1.3.2	Cálculo da reatância síncrona do eixo em quadratura X_q , da reatância subtransitória do eixo em quadratura X_q'' e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto do eixo em quadratura T_{q0}''	66
5.1.3.3	Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo em quadratura	66
5.2	Testes com dados reais obtidos em laboratório	68
5.2.1	Ensaio de rejeição do eixo direto	70
5.2.1.1	Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d	74
5.2.1.2	Cálculo da reatância transitória do eixo direto X_d' e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T_{d0}'	75
5.2.1.3	Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X_d'' e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T_{d0}''	78
5.2.1.4	Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo direto	79
5.2.2	Ensaio de rejeição do eixo arbitrário	81
6	CONCLUSÃO	87
6.1	Trabalhos Futuros	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

As máquinas síncronas compõem uma grande parcela dos sistemas elétricos de potência. Elas estão presentes em muitos lugares, principalmente no que diz respeito à geração de energia, desempenhando o papel de geradores síncronos.

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas trouxe diversos novos recursos no que diz respeito à simulação computacional dos componentes elétricos, desde a simulação de um pequeno transistor, até mesmo à simulação de máquinas elétricas de grande porte, como geradores de energia elétrica de uma usina. Essas simulações tornaram possível a previsão da resposta de componentes elétricos diante de situações adversas. Com simulações dinâmicas, então, é possível fazer o controle e monitoramento de um sistema elétrico, sendo possível a previsão de falhas e análises cada vez mais precisas.

Para que as simulações sejam precisas é de extrema importância que os parâmetros de um gerador síncrono sejam fiéis ao sistema real característico de cada gerador em particular. Esses parâmetros, que descrevem o comportamento dos geradores, muitas vezes não são fornecidos pelo próprio fabricante e além disso, podem sofrer alterações durante sua vida útil. Tais imprevistos podem implicar em simulações incoerentes, refletindo assim negativamente nas mais diversas formas, tanto em projetos falhos, como na ocorrência de *blackouts* imprevistos.

Diversos ensaios são padronizados, conhecidos e bem documentados na literatura técnica para determinar os parâmetros de geradores síncronos, como por exemplo: ensaio de curto-circuito brusco; ensaio de escorregamento; ensaio da máxima corrente indutiva; ensaio de rejeição de carga; entre outros.

1.1 Objetivos

Como citado anteriormanete, existem diversos ensaios que determinam os parâmetros dinâmicos de geradores síncronos. Neste trabalho, utiliza-se o ensaio de rejeição de carga. O objetivo é encontrar experimentalmente, os parâmetros referentes ao eixos direto e em quadratura. E na sequência, otimizar esses parâmetros encontrados, tentando deixa-los mais próximos da realidade com a utilização do método de sensibilidade de trajetória.

1.2 Estrutura

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

O Capítulo 2 trata-se de apresentar brevemente a modelagem de uma máquina síncrona, juntamente com os sistemas de referência adotados e a apresentação da equação

dinâmica de resposta dessas máquinas.

O Capítulo 3 explica o método de estimação de parâmetros via sensibilidade de trajetória e suas etapas em uma aplicação na máquina síncrona.

O Capítulo 4 apresenta um procedimento gráfico aplicado ao método de rejeição de carga para calcular seus parâmetros dinâmicos de forma analítica, tanto do eixo direto, quanto do eixo em quadratura.

O Capítulo 5 mostra os resultados da estimação de parâmetros de um gerador síncrono simulados em computador e, logo após, apresenta a partir de testes práticos realizados em laboratório de um gerador síncrono real.

O Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA

2.1 Máquinas CA

As máquinas de corrente alternada subdividem-se em máquinas síncronas e máquinas de indução. As máquinas de indução podem ser motores, que transformam uma energia elétrica alternada em energia mecânica de rotação, e também podem ser geradores, que por sua vez, transformam energia mecânica de rotação de seu eixo em energia elétrica alternada. As máquinas síncronas também são divididas em motores e geradores, porém diferem-se das máquinas de indução por apresentar uma alimentação separada de corrente contínua em sua bobina de campo. (CHAPMAN, 2013).

2.1.1 Composição da máquina síncrona

As máquinas síncronas apresentam uma parte fixa, chamada comumente de Estator e uma parte móvel que gira internamente ao estator, chamada de rotor. Entre estas há uma interação magnética, causada por uma bobina geralmente feita de fio de cobre esmaltado e um material ferromagnético.

O gerador síncrono, diferentemente das outras máquinas, apresenta um enrolamento de corrente contínua no rotor e um enrolamento trifásico em seu estator. A bobina de campo é localizada na parte giratória e as bobinas de armadura são localizadas na parte estática do corpo da máquina. A Figura 1 mostra o rotor de uma máquina síncrona, já a Figura 2 mostra o estator de uma máquina síncrona.

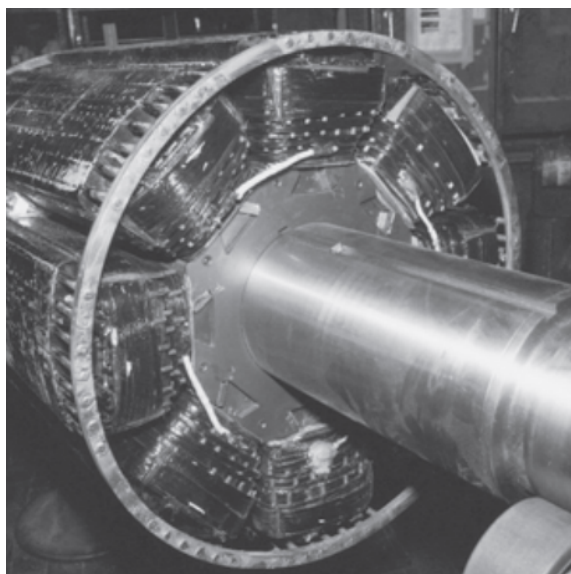


Figura 1: Rotor de uma máquina síncrona



Figura 2: Estator de uma máquina síncrona

2.1.2 Parâmetros primitivos

Em busca de simplificar o comportamento dinâmico do gerador síncrono, é então adotado um sistema de referência em que o estator é um sistema fixo e uma referência girante que segue o rotor em seu movimento de rotação.

A máquina síncrona pode ser modelada em função de dois eixos: o eixo direto, representado por d e o eixo em quadratura, representado por q . Utilizando a transformação de Park ([PARK, 1929](#)), as grandezas a serem estudadas passam a ser traçadas na referência $d - q$ e deixam de depender do ângulo θ . A Figura 3 ilustra o sistema de referências que será adotado neste trabalho e as respectivas variáveis de interesse, que são:

$d - q$: Eixos direto em quadratura;

$Re - Im$: Eixos real e imaginário (referência síncrona);

V_t : Tensão terminal em armadura;

δ : Ângulo do eixo de quadratura em relação à referência síncrona;

θ : Ângulo da tensão terminal em relação à referência síncrona;

β : Ângulo de carga.

Logo, a máquina síncrona pode ser modelada de maneiras diferentes. Uma dessas modelagens se dá em função de parâmetros denominados de primitivos, os quais são descritos por resistências, indutâncias mútuas e indutâncias de dispersão. Todos esses parâmetros são divididos em dois circuitos equivalentes: o circuito equivalente do eixo direto e o circuito equivalente do eixo em quadratura.

A Figura 4 ilustra o circuito equivalente do eixo direto e a Figura 5 ilustra o circuito equivalente do eixo em quadratura, ambos em função dos parâmetros primitivos ([BORTONI; JARDINI, 2002](#)).

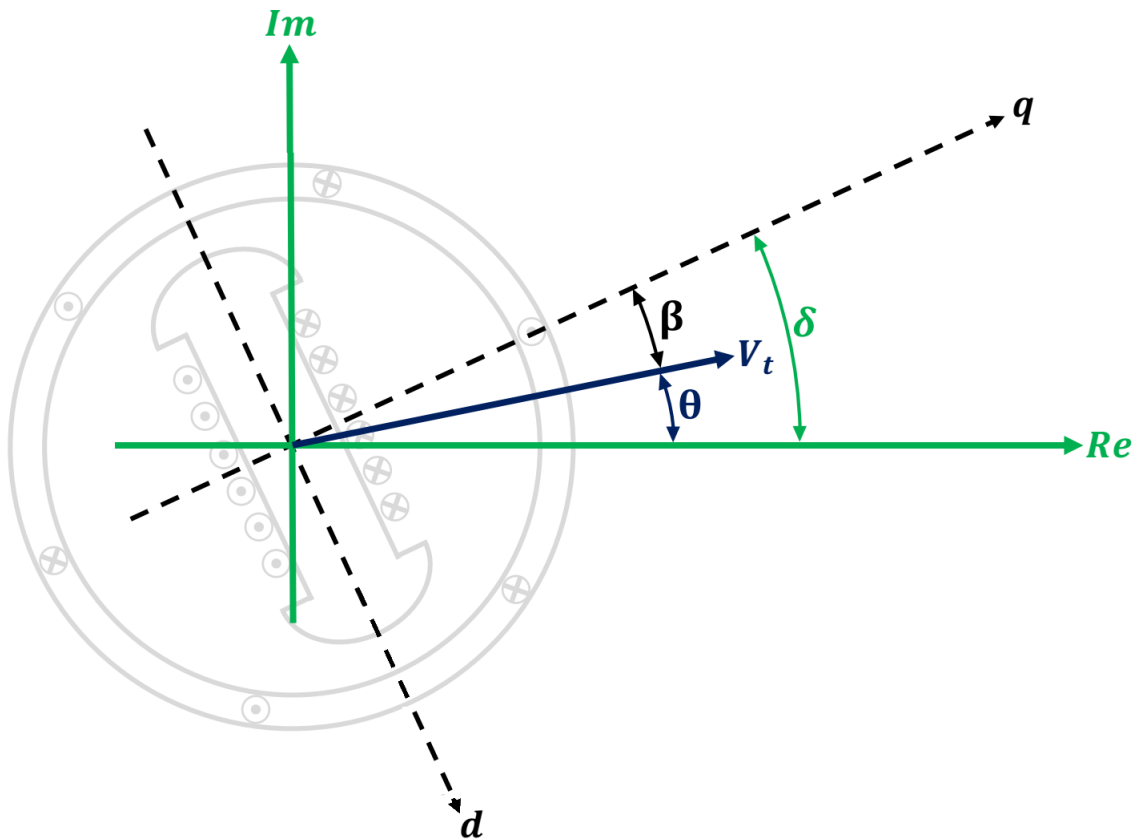


Figura 3: Sistema de referência da máquina síncrona

2.1.3 Parâmetros derivados

Como apontado anteriormente, é possível modelar um gerador síncrono em função de seus parâmetros primitivos, porém esses parâmetros não são encontrados em ensaios de forma direta. Logo, é de maior facilidade e mais conveniente, obter os parâmetros derivados, que também são chamados de parâmetros padronizados (*standart*), que, por sua vez, tratam-se de parâmetros que descrevem a resposta da máquina síncrona em função do tempo e são obtidos em função dos parâmetros primitivos. Os parâmetros padronizados são compostos por reatâncias e constantes de tempo referentes ao regime permanente, transitório e subtransitário da resposta estatórica da máquina em questão.

Os parâmetros padronizados de interesse nos estudos, que podem ser determinados por intermédio de ensaios, são:

X_d : Reatância síncrona do eixo direto;

X'_d : Reatância transitória do eixo direto;

X''_d : Reatância subtransitória do eixo direto;

T'_{d0} : Constante de tempo transitória de circuito aberto do eixo direto;

T''_{d0} : Constante de tempo subtransitória de circuito aberto do eixo direto;

X_q : Reatância síncrona do eixo em quadratura;

X'_q : Reatância transitória do eixo em quadratura;

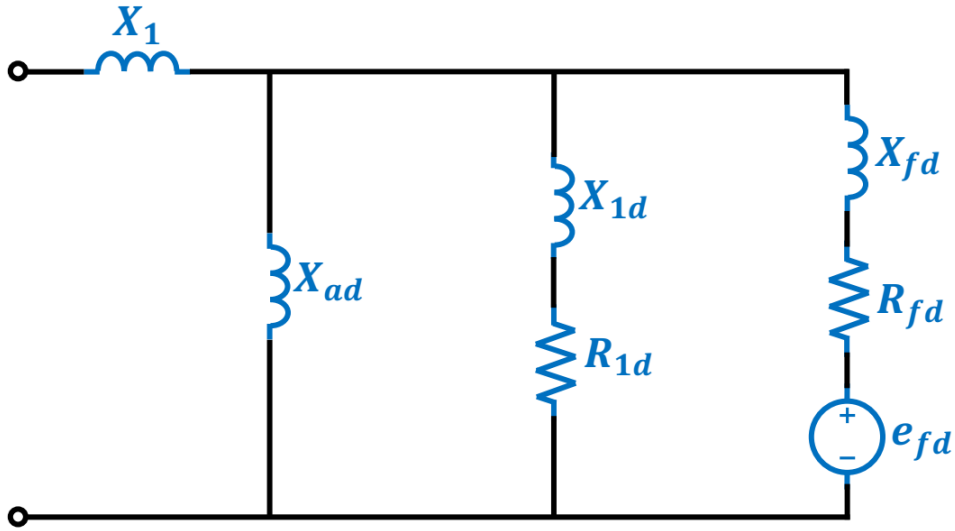


Figura 4: Circuito equivalente do eixo direto

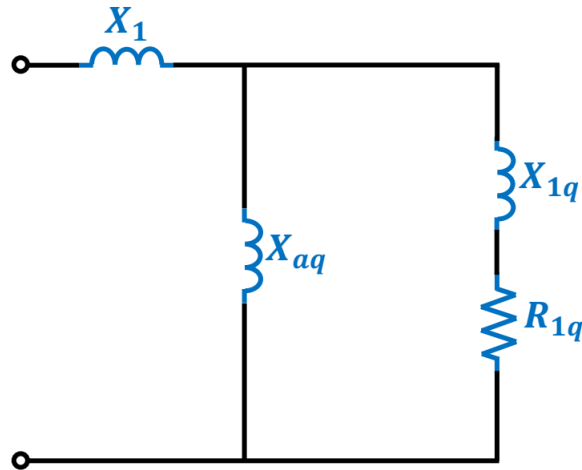


Figura 5: Circuito equivalente do eixo em quadratura

X_q'' : Reatância subtransitória do eixo em quadratura;

T_{q0}' : Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura;

T_{q0}'' : Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura.

Esses são os parâmetros usualmente inseridos nos *softwares* de simulações computacionais de máquinas síncronas.

2.1.4 Modelagem da máquina síncrona para rejeição de carga

A seguir é mostrado o desenvolvimento de (BORTONI; JARDINI, 2002), que equaciona a máquina síncrona em termos dos parâmetros padronizados, partindo das variáveis contidas nos circuitos equivalentes das Figuras 4 e 5.

O modelagem da máquina síncrona para o teste de rejeição de carga pode ser feito em três passos. O primeiro, leva em consideração somente o regime permanente, antes da rejeição, o segundo analisa o regime transitório depois da rejeição e o terceiro analisa os resultados obtidos para obter o comportamento da máquina síncrona.

2.1.4.1 Regime permanente

Tem-se as três fases com tensões simétricas produzidas

$$\begin{aligned} u_a &= U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta) \\ u_b &= U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta - 120^\circ) \\ u_c &= U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Das projeções nos eixos $d - q$, obtêm-se

$$\begin{aligned} u_{d0} &= U \cdot \text{sen}(\beta) \\ u_{q0} &= U \cdot \cos(\beta) \\ u_{00} &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Logo, a tensão de armadura é recalculada como

$$u_a = u_{d0} \cdot \cos(\omega t) - u_{q0} \cdot \text{sen}(\omega t) + u_{00} \quad (2.3)$$

No caso de uma carga balanceada, é desprezada a resistência de armadura e as projeções das correntes nos eixos $d - q$ passam a ser

$$\begin{aligned} i_{d0} &= \frac{E - U \cdot \cos(\beta)}{X_d} \\ i_{q0} &= \frac{U \cdot \text{sen}(\beta)}{X_q} \\ i_{00} &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

As equações de ligação de fluxo são

$$\begin{aligned} \psi_d &= -X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{ad} \cdot i_{kd} \\ \psi_q &= -X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{kq} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Sabe-se também que

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \cdot \psi_q - r \cdot i_d \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \cdot \psi_d - r \cdot i_q \end{aligned} \quad (2.6)$$

No regime permanente, sem corrente no enrolamento amortecedor, com carga balanceada, desprezando a resistência de armadura e tomando a velocidade angular como 1 pu

$$\begin{aligned} u_{d0} &= -\psi_{q0} \\ u_{q0} &= \psi_{d0} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Utilizando as equações 2.2 e 2.7, pode-se obter as condições iniciais do eixo direto e do eixo em quadratura

$$\begin{aligned} \psi_{q0} &= U \cdot \sin(\beta) \\ \psi_{d0} &= -U \cdot \cos(\beta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.1.4.2 Regime transitório

O regime transitório é estudado analisando a variação dos fluxos concatenados do eixo direto e do eixo em quadratura. Também são utilizadas as condições iniciais previamente calculadas. Aplicando a transformada de Laplace no circuito equivalente da Figura 4, a variação do fluxo concatenado no eixo direto tem-se

$$\Delta\psi_{d0}(s) = X_d \cdot \Delta i_{d0}(s) \quad (2.9)$$

Para a máquina síncrona sem enrolamento amortecedor e polos completamente laminados

$$X_d(s) = X_1 + \frac{1}{\left(\frac{1}{X_{ad}}\right) + \left(\frac{1}{X_d + r_f/s}\right)} = X_d - \frac{s \cdot (X_{ad})^2}{s \cdot (X_{ad} + X_f) + r_f} \quad (2.10)$$

Em 2.10, X_1 é a indutância de armadura de dispersão e X_{ad} é a induância mútua do eixo direto ($X_d = X_1 + X_{ad}$). Considerando que a rejeição de carga é uma variação de corrente negativa

$$\Delta\psi_d(s) = \left(\frac{i_{d0}}{s}\right) \cdot \left[X_d - \frac{s \cdot (X_{ad})^2}{s \cdot (X_{ad} + X_f) + r_f}\right] \quad (2.11)$$

Aplicando a transformada de Laplace inversa, pode-se obter a variação do fluxo concatenado em um regime transitório

$$\Delta\psi_d(s) = i_{d0} \cdot \left[X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{\left(-t/T'_{d0}\right)}\right] \quad (2.12)$$

Levando-se em conta os efeitos do enrolamento amortecedor, tem-se

$$\Delta\psi_d(s) = i_{d0} \cdot \left[X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{\left(-t/T'_{d0}\right)} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{\left(-t/T''_{d0}\right)} \right] \quad (2.13)$$

No caso do eixo em quadratura, representado pela Figura 5. Os mesmos procedimentos do eixo direto são aplicados, obtendo-se o seguinte

$$\Delta\psi_q(s) = i_{q0} \cdot \left[X_q - (X_q - X''_q) \cdot e^{\left(-t/T''_{q0}\right)} \right] \quad (2.14)$$

Quando não há enrolamento amortecedor no eixo em quadratura

$$\Delta\psi_q = i_{q0} \cdot X_q \quad (2.15)$$

2.1.4.3 Descrição da rejeição de carga

O comportamento da máquina síncrona em regime transitório de rejeição de carga pode ser obtido por meio dos fenômenos que ocorrem antes e depois da rejeição. Dessa forma, o fluxo concatenado no eixo direto é

$$\psi_d = \psi_{d0} + \Delta \cdot \psi_d = -U \cdot \cos(\beta) + i_{d0} \cdot \left[X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{\left(-t/T'_{d0}\right)} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{\left(-t/T''_{d0}\right)} \right] \quad (2.16)$$

Da mesma forma, tem-se para o eixo em quadratura

$$\psi_q = \psi_{q0} + \Delta \cdot \psi_q = U \cdot \sin(\beta) + i_{q0} \cdot \left[X_q - (X_q - X''_q) \cdot e^{\left(-t/T''_{q0}\right)} \right] \quad (2.17)$$

Com os valores obtidos na equação 2.6, tomando $\omega = 1pu$ e desprezando a resistência de armadura, tem-se

$$\begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \end{aligned} \quad (2.18)$$

As parcelas $\frac{d\psi_d}{dx}$ e $\frac{d\psi_q}{dx}$ representam efeitos transformatórios que ocorrem na máquina quando a carga é bruscamente alterada, é produzida uma irregularidade e componentes

harmônicos na armadura. Esse fenômeno pode ser desprezado. Logo

$$\begin{aligned} u_d = -\psi_q &= U \cdot \text{sen}(\beta) + i_{q0} \cdot \left[X_q - (X_q - X_q'') \cdot e^{\left(-t/T_{q0}''\right)} \right] \\ u_q = \psi_d &= -U \cdot \text{cos}(\beta) + i_{d0} \cdot \left[X_d - (X_d - X_d') \cdot e^{\left(-t/T_{d0}'\right)} - (X_d' - X_d'') \cdot e^{\left(-t/T_{d0}''\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Substituindo a equação 2.3 na equação 2.19, tem-se

$$\begin{aligned} u_a &= U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta) - i_{q0} \cdot [X_q - (X_q'' - X_q'') \cdot e^{-t/T_{q0}''}] \cdot \text{cos}(\omega t) - \dots \\ &\dots - i_{d0} \cdot [X_d - (X_d - X_d') \cdot e^{-t/T_{d0}'} - (X_d' - X_d'') \cdot e^{-t/T_{d0}''}] \cdot \text{sen}(\omega t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Quando não há corrente no eixo em quadratura, ou seja, $i_{q0} = 0$ e $\beta = 0$

$$u_a = \left\{ U - i_{d0} \cdot [X_d - (X_d - X_d') \cdot e^{-t/T_{d0}'} - (X_d' - X_d'') \cdot e^{-t/T_{d0}''}] \right\} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.21)$$

Por outro lado, quando não há corrente no eixo direto, ou seja, ângulo do fator de potência $\phi = \beta$

$$u_a = U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta) - i_{q0} \cdot [X_q - (X_q'' - X_q'') \cdot e^{-t/T_{q0}''}] \cdot \text{cos}(\omega t) \quad (2.22)$$

Dessa forma, tem-se descritas as equações da tensão de armadura após a rejeição de carga no eixo direto pela equação 2.21 e no eixo em quadratura pela equação 2.22.

3 MÉTODO DE SENSIBILIDADE DE TRAJETÓRIA

3.1 Estimação de parâmetros

A estimação de parâmetros consiste num processo de busca dos parâmetros que melhor representem um sistema real, seja ele qual for, a partir de suas saídas. Um sistema pode ser classificado como dinâmico, quando o comportamento das variáveis evolui com o tempo, ou estático, quando isso não acontece. O processo de identificação consiste em, primeiramente, obter as medidas da saída de um sistema real. Logo após é escolhido o modelo adequado referente ao sistema em análise. Por fim, são estimados os parâmetros por intermédio de um algoritmo via análise computacional (CARI, 2009). A metodologia da estimação via sensibilidade de trajetória é apresentada a seguir.

3.2 Procedimentos de estimação via método de sensibilidade de trajetória

Seja $y = f(u, p, t)$ um sistema em que u é um vetor que contém as entradas do sistema, p é um vetor que contém os parâmetros do sistema e t é o tempo.

3.2.1 Cálculo do erro funcional $J(p)$

A primeira etapa do procedimento de estimação dos parâmetros é encontrar a função objetivo chamada de $J(p)$. Esta função é obtida por meio da relação entre a saída do sistema real e a saída do sistema auxiliar. Esse modelo auxiliar é um modelo matemático que sofre ajustes de seus parâmetros durante as iterações. A relação entre as saídas dos modelos segue a equação 3.1, onde y_m corresponde à saída medida do sistema real e y corresponde à saída do modelo matemático.

$$J(p) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=0}^N \left[(y_m(tn)) - y(tn, p) \right]^T \cdot (y_m(tn) - y(tn, p)) \cdot \Delta t \quad (3.1)$$

Na equação 3.1 N é o número de amostras distintas e Δt é o passo dado por

$$\Delta t = \frac{t_{final} - t_{inicial}}{N}$$

Sempre procura-se minimizar a função objetivo, logo o valor ideal seria $J(p) = 0$, Porém na prática, esse valor não é possível, uma vez que nunca se chega ao zero absoluto, logo, é então definido um valor de tolerância aceitável para o erro. O valor de erro funcional é então comparado com o erro estabelecido. Caso $J(p) \leq \text{tolerância}$, o procedimento de estimação está terminado, caso contrário, inicia-se o procedimento iterativo.

3.2.2 Cálculo da sensibilidade $\frac{\partial y}{\partial p}$

A função sensibilidade de trajetória é mostrada na equação 3.2. A sensibilidade de trajetória, ou seja, a sensibilidade da saída do sistema, quantifica a variação da saída em função do parâmetro, ou em função dos parâmetros, caso o sistema tenha mais que um parâmetro a ser estimado. Neste último caso, a função sensibilidade é chamada de matriz de sensibilidade.

$$\frac{\partial y}{\partial p} \quad (3.2)$$

3.2.3 Cálculo de $G(p)$ e $\Gamma(p)$

O próximo passo é calcular os valores de $G(p)$, que corresponde à sensibilidade do erro funcional em relação aos parâmetros e calcular também o valor de $\Gamma(p)$, segundo as equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$G(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p} = \sum_{n=0}^N \left[\left(\frac{\partial y(tn, p)}{\partial p} \right)^T \cdot (y_m(tn) - y(tn, p)) \cdot \Delta t \right] \quad (3.3)$$

$$\Gamma(p) = \sum_{n=0}^N \left[\left(\frac{\partial y(tn, p)}{\partial p} \right)^T \cdot \left(\frac{\partial y(tn, p)}{\partial p} \right) \cdot \Delta t \right]_{p=p^{(k)}} \quad (3.4)$$

3.2.4 Cálculo do vetor Δp de ajustes dos parâmetros

Para iniciar a estimação dos parâmetros é necessário uma estimativa inicial, ou seja, inserir um valor inicial em cada parâmetro para que o algoritmo tenha um ponto de partida. Esse valor inicial, deve de preferência ser próximo do valor real do mesmo.

O próximo passo, é calcular o vetor Δp , conforme a equação 3.5. É importante observar que Δp tem um valor diferente a cada iteração, por isso é utilizado um coeficiente k para sua identificação. Sendo assim, Δp_1 corresponde ao vetor de ajustes dos parâmetros da 1ª iteração, Δp_2 ao vetor de ajustes da 2ª iteração, assim por diante. Já a equação 3.6 é utilizada para corrigir o valor de p no processo iterativo da seguinte forma: somando, o valor antigo de p ao valor de ajuste de Δp , obtendo o novo valor de p .

$$\Delta p^{(k)} = \Gamma^{-1}(p) \cdot G(p) \mid_{p=p^{(k)}} \quad (3.5)$$

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} + \Delta p^{(k)} \quad (3.6)$$

Após os ajustes utilizando Δp , é novamente calculado o valor do erro funcional e o algoritmo entra em *loop*. O fluxograma do processo de estimação de parâmetros por sensibilidade de trajetória é mostrado detalhadamente na Figura 6.

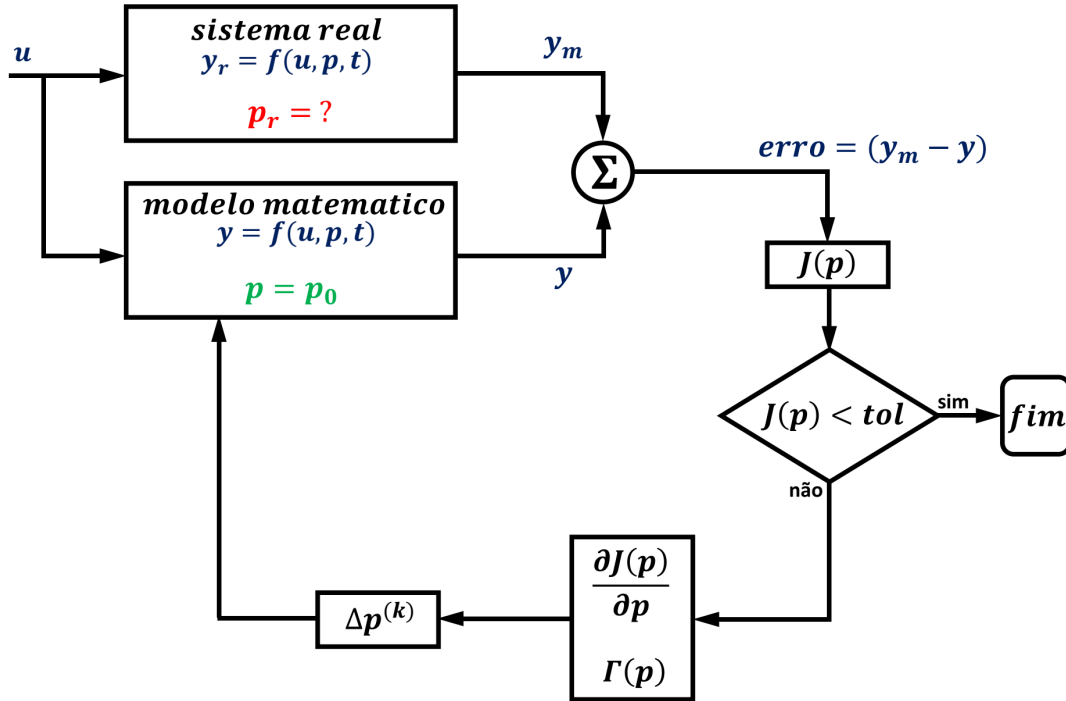


Figura 6: Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória

3.3 Método de sensibilidade de trajetória aplicado à estimação de parâmetros via teste de rejeição de carga em máquinas síncronas

3.3.1 Método aplicado ao ensaio de rejeição do eixo direto

Para aplicação do método de sensibilidade de trajetória ao teste de rejeição de carga do eixo direto é utilizada a envoltória da equação 2.21. A nova equação utilizada neste método segue apresentada na equação 3.7

$$u_a = \left\{ U - i_{d0} \cdot [X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{-t/T'_{d0}} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{-t/T''_{d0}}] \right\} \quad (3.7)$$

A equação 4.1 é do tipo $y = f(x, p, c, u)$, onde:

y = saída medida;

x = estado ou variável algébrica;

p = parâmetros a serem estimados;

c = parâmetros conhecidos considerados constantes;

u = entradas medidas;

A Figura 7 ilustra o método de sensibilidade de trajetória aplicado à estimação de parâmetros de máquinas síncronas por meio da rejeição de carga do eixo direto. Nela:

$$y = u(t);$$

$$x = t;$$

$$p = [X_d, X'_d, X''_d, T'_{d0}, T''_{d0}];$$

c = não há constantes neste caso;

$$u = [I_0, U_0];$$

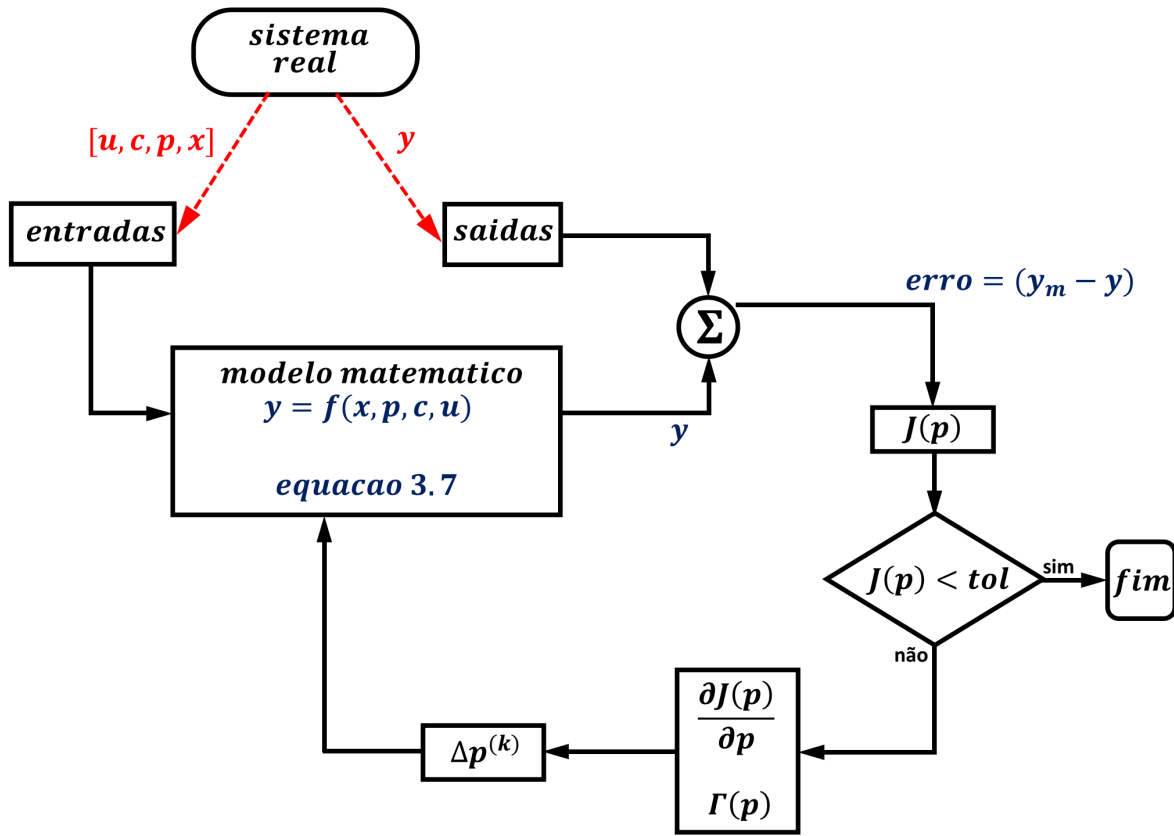


Figura 7: Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória aplicado à rejeição de carga do eixo direto

3.3.2 Método aplicado ao ensaio de rejeição do eixo arbitrário

Para aplicação do método de sensibilidade de trajetória ao ensaio de rejeição de carga do eixo arbitrário é utilizada a equação 3.8 como modelo matemático. Também deve ser observado que neste método deve-se ter uma estimativa inicial para os parâmetros referentes ao eixo direto, os quais já se tem conhecimento.

$$\begin{aligned}
 u_a = & U \cdot \text{sen}(\omega t - \beta) - i_{q0} \cdot [X_q - (X''_q - X'_q) \cdot e^{-t/T''_{q0}}] \cdot \cos(\omega t) - \dots \\
 & \dots - i_{d0} \cdot [X_d - (X'_d - X''_d) \cdot e^{-t/T'_{d0}} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{-t/T''_{d0}}] \cdot \text{sen}(\omega t)
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

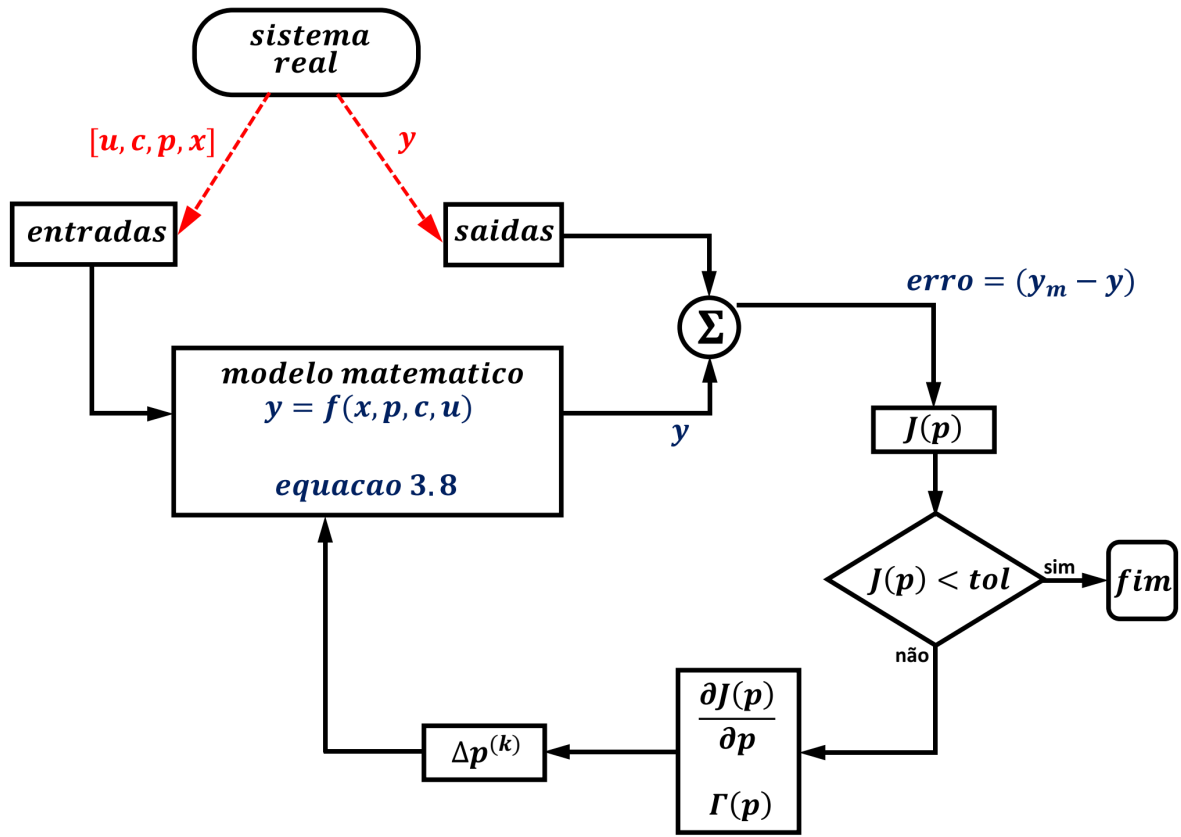


Figura 8: Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória aplicado a rejeição de carga do eixo arbitrário

A equação 3.8 é do tipo $y = f(x, p, c, u)$, onde:

- y = saída medida;
- x = estado ou variável algébrica;
- p = parâmetros a serem estimados;
- c = parâmetros conhecidos considerados constantes;
- u = entradas medidas;

A Figura 8 ilustra o método de sensibilidade de trajetória aplicado à estimação de parâmetros de máquinas síncronas por meio da rejeição de carga do eixo direto. Nela:

- $y = u(t)$;
- $x = t$;
- $p = [X_q, X_q'', T_{q0}'', \beta_0]$;
- $c = [X_d, X_d', X_d'', T_{d0}', T_{d0}']$;
- $u = [\omega(t), \phi_0, I_0, U_0]$;

Assim como já foi dito, o método de estimação via sensibilidade de trajetória necessita de um valor inicial de seus parâmetros p_0 para iniciar o método iterativo. Porém para que o algoritmo do método apresente bons resultados, ou seja, seja capaz de convergir em seus resultados, é necessário que esses valores iniciais sejam os mais próximos possíveis dos valores reais. Esses valores iniciais podem ser obtidos via banco de dados de valores típicos de geradores síncronos de características semelhantes ao gerador sob estudo ou via ensaios práticos.

Este trabalho propõe uma forma de encontrar esses valores para as estimativas iniciais realizando o teste de rejeição de carga, um teste padronizado que será apresentado no próximo capítulo.

4 PROCEDIMENTO DE ESTIMAR PARÂMETROS POR MÉTODO ANALÍTICO (GRÁFICO) UTILIZANDO TESTE DE REJEIÇÃO DE CARGA

Analisando a literatura, o teste de rejeição de carga tem sido muito utilizado para identificação de parâmetros de máquinas síncronas (MELLO; RIBEIRO, 1977), (BORTONI; JARDINI, 2002), (MELLO; RIBEIRO, 1977), (DANDENO et al., 2003) (GUIDE, 2010) realizaram diversas proposições à respeito. (MELLO; RIBEIRO, 1977) mostra uma forma de se obter os parâmetros de cada eixo de uma máquina síncrona separadamente, ou seja, encontrar os parâmetros referentes ao eixo direto por meio de um teste e aqueles referentes ao eixo em quadratura por meio de outro teste. Assim, o teste de rejeição de carga passa a ter dois ensaios: rejeição do eixo direto e rejeição do eixo em quadratura.

No Laboratório de Dinâmica de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) já foram realizados trabalhos de estimação de parâmetros baseados em rejeição de carga. (FAJONI et al., 2010) apresenta resultados de ensaios feitos em bancada e utiliza uma metodologia analítica semelhante à metodologia que será apresentada neste trabalho.

Em suma, os ensaios do teste de rejeição de carga consistem na aplicação de uma determinada carga em um gerador síncrono e em certo instante essa carga é subitamente desconectada do gerador, seja por um disjuntor ou por outro dispositivo de seccionamento, seguida de uma parada simultânea da turbina acoplada ao gerador, se for o caso de geradores isolados. Os parâmetros são obtidos por meio da análise da envoltória da tensão nos terminais da armadura, a partir de um instante imediatamente antes da rejeição até um intervalo de tempo depois desta, até a tensão entre em regime permanente (CARCASI; BALDOMERO et al., 2012).

4.1 Ensaio de rejeição de carga do eixo direto

O ensaio de rejeição do eixo direto consiste em aplicar uma carga de potência ativa nula e potência reativa pura. Para que esta condição seja atingida deve-se colocar uma carga totalmente capacitiva, uma vez que uma carga totalmente indutiva não é alcançada na prática, devido às resistências parasitas nos indutores. É aconselhável que o gerador esteja subexcitado para garantir a obtenção de parâmetros não saturados.

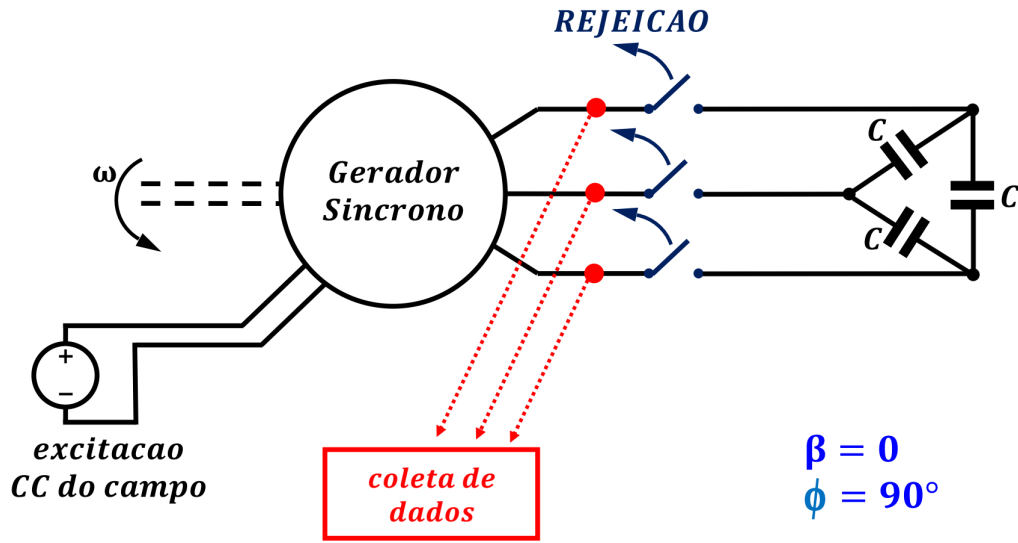


Figura 9: Esquemático de rejeição do eixo direto

Quando o gerador trabalha com uma carga puramente capacitiva, como esquematizado na Figura 9, há apenas corrente no eixo direto, assim como é observado no diagrama fasorial da Figura 10. Tomam-se como referência síncrona o vetor da tensão terminal de armadura V_t e na condição de carga puramente capacitiva, o ângulo de carga $\beta = 0$ e o ângulo do fator de potência $\phi = 90^\circ$. Consequentemente, a componente da corrente do eixo de quadratura $i_{q0} = 0$.

Durante o ensaio de rejeição de carga do eixo direto, há um monitoramento das tensões e das correntes. A carga é subitamente desconectada do gerador. Neste instante a corrente cai até zero e a tensão tem uma queda nos instantes logo após a rejeição. As tensões e correntes das três fases continuam a ser monitoradas. Como após a rejeição de carga, a corrente cai a zero, apenas será usada a corrente antes da rejeição denotada pelo índice "0" como L_{d0} e L_{q0} que pode ser calculada pela equação 2.4

A Figura 11 mostra como se comporta a envoltória da tensão terminal após o ensaio de rejeição de carga do eixo direto.

O fato da componente no eixo de quadratura $i_{q0} = 0$, faz com que os parâmetros referentes ao eixo de quadratura sejam anulados na equação 2.20. Dessa forma a tensão na armadura após a rejeição do eixo direto passa a ser definida na equação 4.1.

$$u_a = \left\{ U - i_{d0} \cdot [X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{-t/T'_{d0}} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{-t/T''_{d0}}] \right\} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (4.1)$$

Onde, U é a tensão de armadura antes da rejeição como mostra a Figura 12.

Tomando-se por base a metodologia gráfica descrita em (GUIDE, 2010), quando

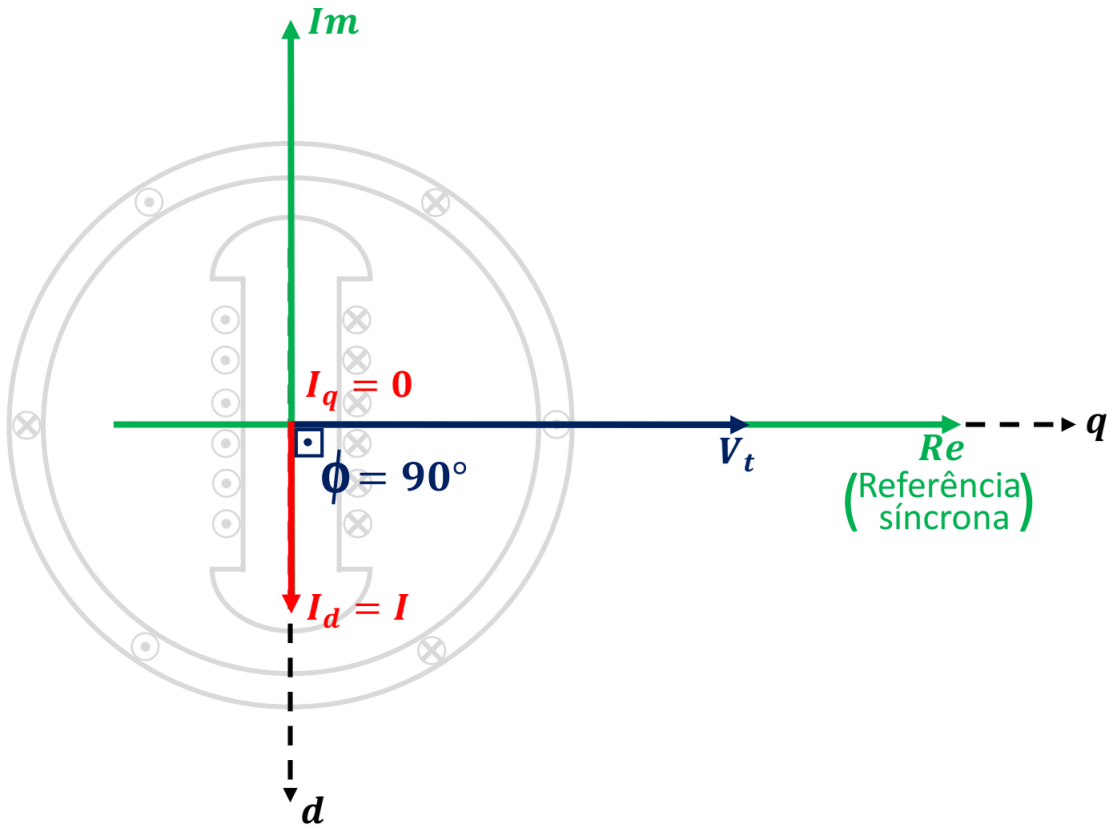


Figura 10: Diagrama fasorial após a rejeição de carga do eixo direto

toma-se a envoltória do decaimento da tensão, é possível escrever

$$u_{a_{env}}(t) = U - i_{d0} \cdot [X_d - (X_d - X'_d) \cdot e^{-t/T'_{d0}} - (X'_d - X''_d) \cdot e^{-t/T''_{d0}}] \quad (4.2)$$

Para simplificar o que resta deste capítulo, $u_{a_{env}}(t) = u_a$

Definindo

$$V_{q\infty} = U - X_d \cdot i_{d0} \quad (4.3)$$

$$V'_{q0} = i_{d0} \cdot (X_d - X'_d) \quad (4.4)$$

$$V''_{q0} = i_{d0} \cdot (X'_d - X''_d) \quad (4.5)$$

E substituindo as equações 4.3, 4.4 e 4.5 na equação 4.2, é possível escrever

$$u_a(t) = V_{q\infty} + V'_{q0} \cdot e^{-t/T'_{d0}} + V''_{q0} \cdot e^{-t/T''_{d0}} \quad (4.6)$$

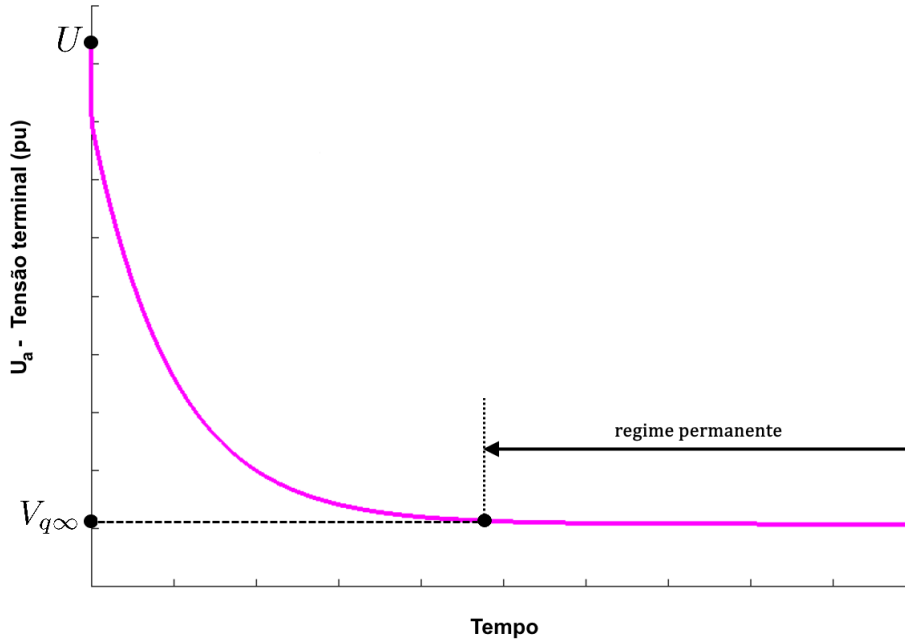


Figura 11: Curva da envoltória da tensão terminal após a rejeição de carga do eixo direto

4.1.1 Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d

É possível observar o valor de $V_{q\infty}$ em pu na curva da Figura 11, que é exatamente onde se inicia o regime permanente, ou seja, onde a tensão passa a ser constante. De posse deste valor, da tensão imediatamente antes da rejeição U e da corrente também imediatamente antes da rejeição do eixo direto i_{d0} , calcula-se a reatância síncrona do eixo direto X_d utilizando a equação 4.3.

4.1.2 Cálculo da reatância transitória do eixo direto X'_d e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T'_{d0}

Considerando que a parcela $(V''_{q0} \cdot e^{-t/T'_{d0}})$ correspondente ao decaimento do regime subtransitório é bem pequena em comparação à parcela referente ao decaimento do regime transitório, a primeira pode ser desprezada nesta etapa. Portanto, se subtraindo $V_{q\infty}$ na equação 4.6 e tomando o logaritmo natural de ambos os lados, tem-se

$$\ln(u_a(t) - V_{q\infty}) = \ln(V'_{q0} \cdot e^{-t/T'_{d0}}) \quad (4.7)$$

Consequentemente, tomando-se a curva da tensão $(u_a - V_{q\infty})$ em escala semi logarítmica como mostrado na Figura 12, é possível observar um pequeno decaimento e uma reta no regime transitório. Considerando analiticamente como regime transitório a região logo após o pequeno decaimento, obtendo-se a melhor reta sobre o regime transitório. Por meio de uma regressão linear, assume-se que o coeficiente angular da melhor reta encontrada é m_1 e o coeficiente linear da melhor reta é h_1 .

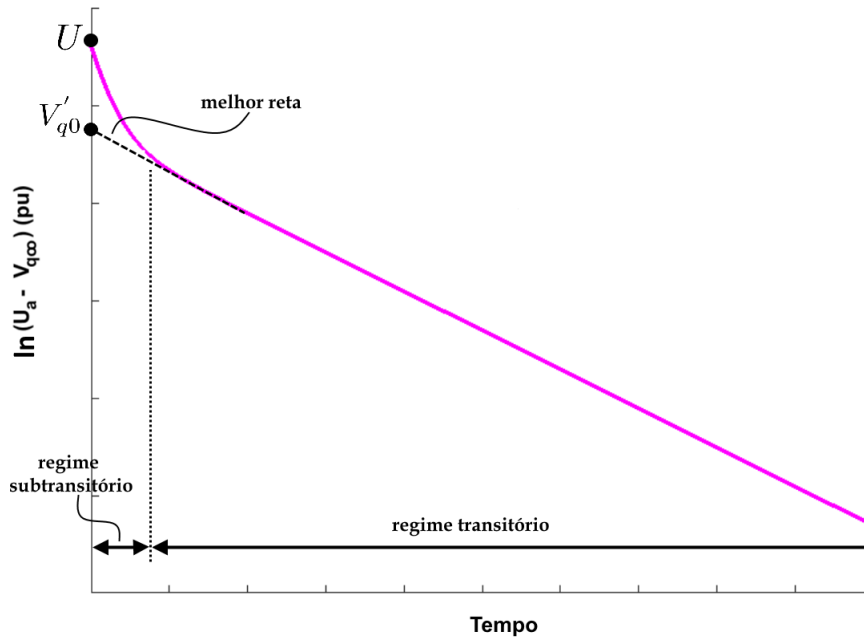


Figura 12: Envolvória da tensão terminal sem a componente de regime permanente em escala semi logaritmica

Obedecendo as equações 4.8 e 4.9, é possível calcular a reatância transitória do eixo direto X'_d e a constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T'_{d0} , respectivamente por

$$m_1 = \frac{1}{T'_{d0}} \quad (4.8)$$

$$e^{h_1} = V'_{q0} = i_{d0} \cdot (X_d - X'_d) \quad (4.9)$$

4.1.3 Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X''_d e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T''_{d0}

De posse dos valores de X_d e T'_{d0} , deve-se agora considerar a parcela $(V''_{q0} \cdot e^{-t/T''_{d0}})$, que foi desprezada no item 4.1.2. Substitui-se os valores de $V_{q\infty}$, V'_{q0} na equação 4.6 e toma-se o logarítmo natural conforme

$$\ln(u_a(t) - V_{q\infty} - V'_{q0}) \cdot e^{-t/T'_{d0}} = \ln(V'_{q0} \cdot e^{-t/T''_{d0}}) \quad (4.10)$$

Novamente tomando-se a curva da tensão $(u_a - V_{q\infty} - V'_{q0}) \cdot e^{-t/T'_{d0}}$ em escala semi logaritmica como mostrado na Figura 13, é possível observar uma reta correspondente apenas ao regime subtransitário. Obtém-se, então, a melhor reta sobre esse regime subtransitário e é assumido que o coeficiente angular da melhor reta encontrada é m_2 e o coeficiente linear da melhor reta é h_2 .

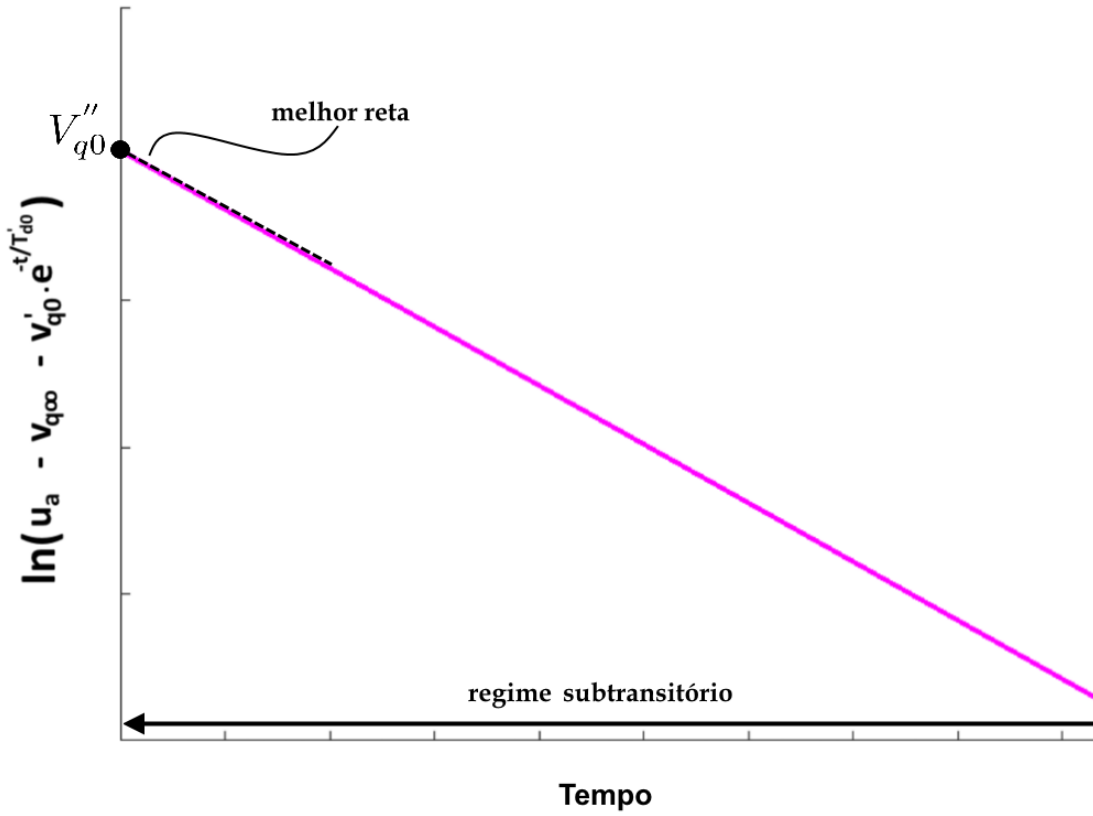


Figura 13: Envoltória da tensão terminal do subtransitório em escala semi logaritmica

Obedecendo as equações 4.11 e 4.12, é possível calcular a reatância subtransitória do eixo direto X''_d e a constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T''_{d0} por meio de

$$m_2 = \frac{1}{T''_{d0}} \quad (4.11)$$

$$e^{h_2} = V''_{q0} = i_{d0} \cdot (X'_d - X''_d) \quad (4.12)$$

4.2 Ensaio de rejeição de carga do eixo em quadratura

No ensaio em rejeição do eixo em quadratura aplica-se uma carga específica para que a componente da corrente no eixo direto seja $i_{d0} = 0$. Para que tal situação aconteça, é necessário que o ângulo de carga β seja igual ao ângulo do fator de potência ϕ no momento da rejeição. Dessa forma, o vetor corrente I coincide com o eixo em quadratura e a componente $i_{q0} = I$, como ilustrado na Figura 14.

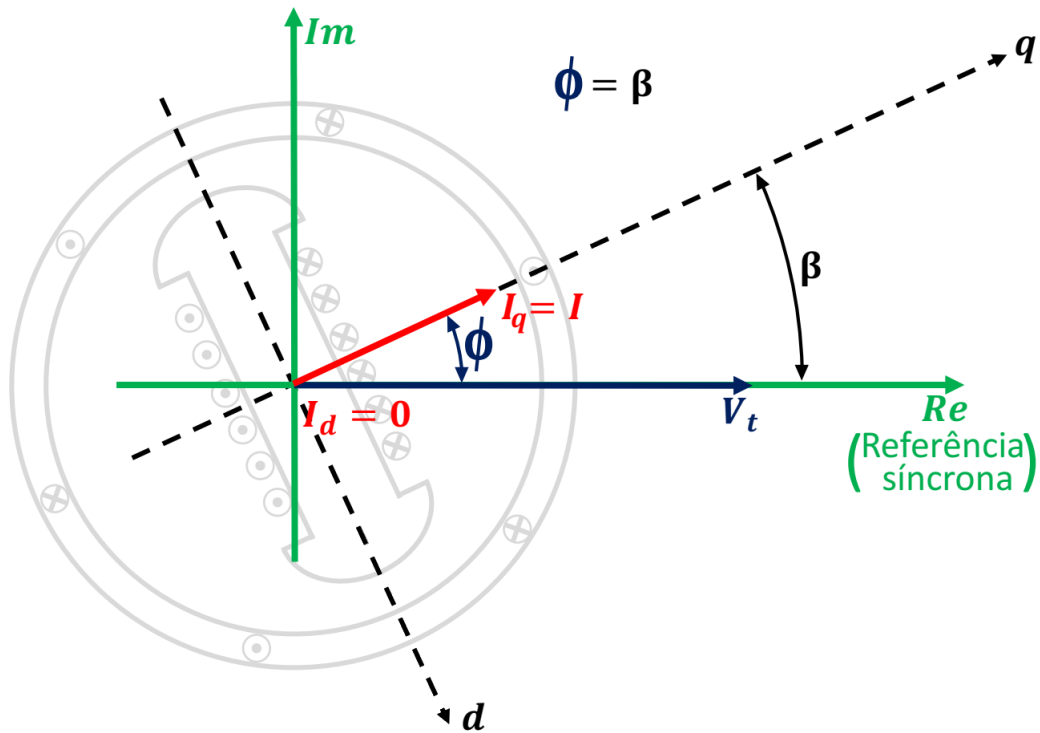


Figura 14: Diagrama fasorial da rejeição de carga do eixo em quadratura

4.2.1 Cálculo da reatância síncrona do eixo em quadratura X_q e da reatância subtransitória do eixo em quadratura X_q''

A curva envoltória de tensão do gerador em um ensaio de rejeição do eixo em quadratura é mostrada na Figura 15. Nela seguem as informações da tensão base do gerador E (utilizada para as transformações em pu) - logo seu valor $E = 1$. Também apresenta-se a tensão terminal imediatamente antes da rejeição U e também os valores A , B e C . De acordo com (MELLO; RIBEIRO, 1977), uma maneira de calcular os parâmetros de reatância síncrona do eixo em quadratura X_q e da reatância subtransitória do eixo em quadratura X_q'' é utilizar as equações 4.13 e 4.14, respectivamente.

$$X_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{i_{q0}} \quad (4.13)$$

$$X_q'' = \frac{(\sqrt{A^2 - C^2}) - (\sqrt{B^2 - C^2})}{i_{q0}} \quad (4.14)$$

O problema deste ensaio é a necessidade de medir o ângulo de carga β seria necessário um instrumento acoplado no eixo do gerador que na prática não se dispõe, por esse motivo não foi feita a parte experimental deste ensaio.

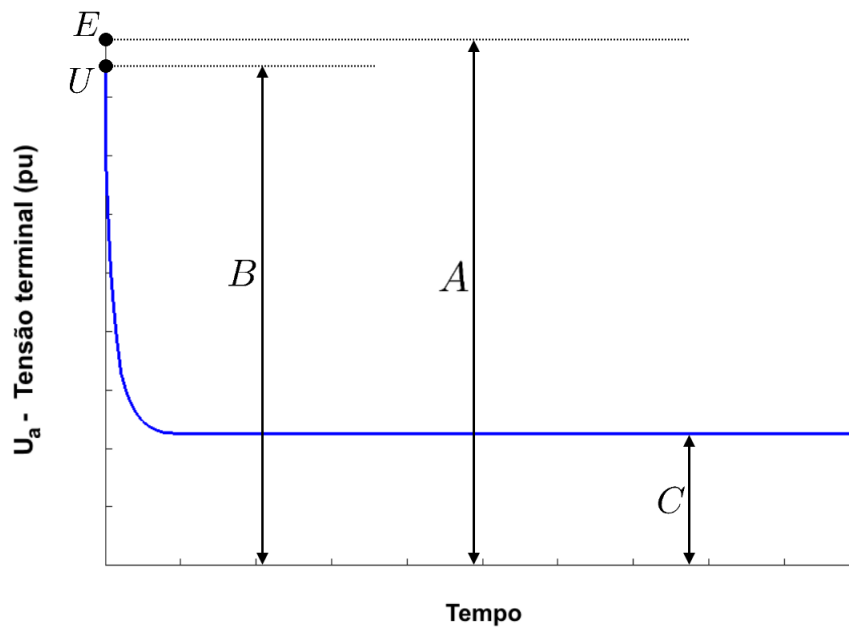


Figura 15: Envoltória da tensão de armadura na rejeição de carga do eixo em quadratura

4.3 Ensaio de rejeição de carga do eixo arbitrário

No ensaio de rejeição de carga do eixo arbitrário é aplicada uma carga arbitrária ao gerador, ou seja, é colocada uma carga ativa e reativa, sem se preocupar, a princípio, com o ângulo do fator de potência ϕ entre a tensão terminal e a corrente, como esquematizado na Figura 16.

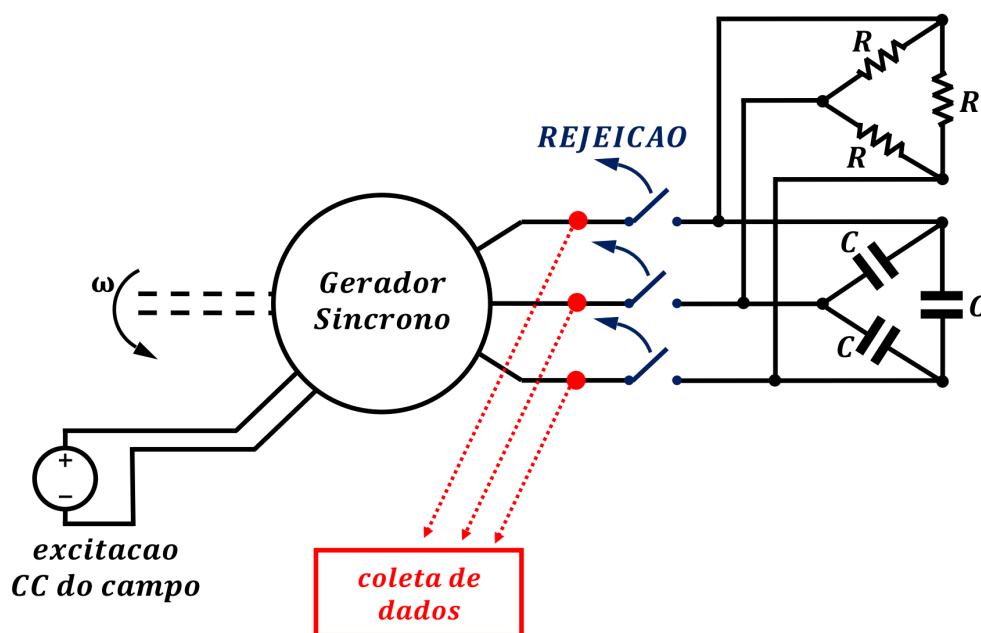


Figura 16: Esquemático de rejeição do eixo arbitrário

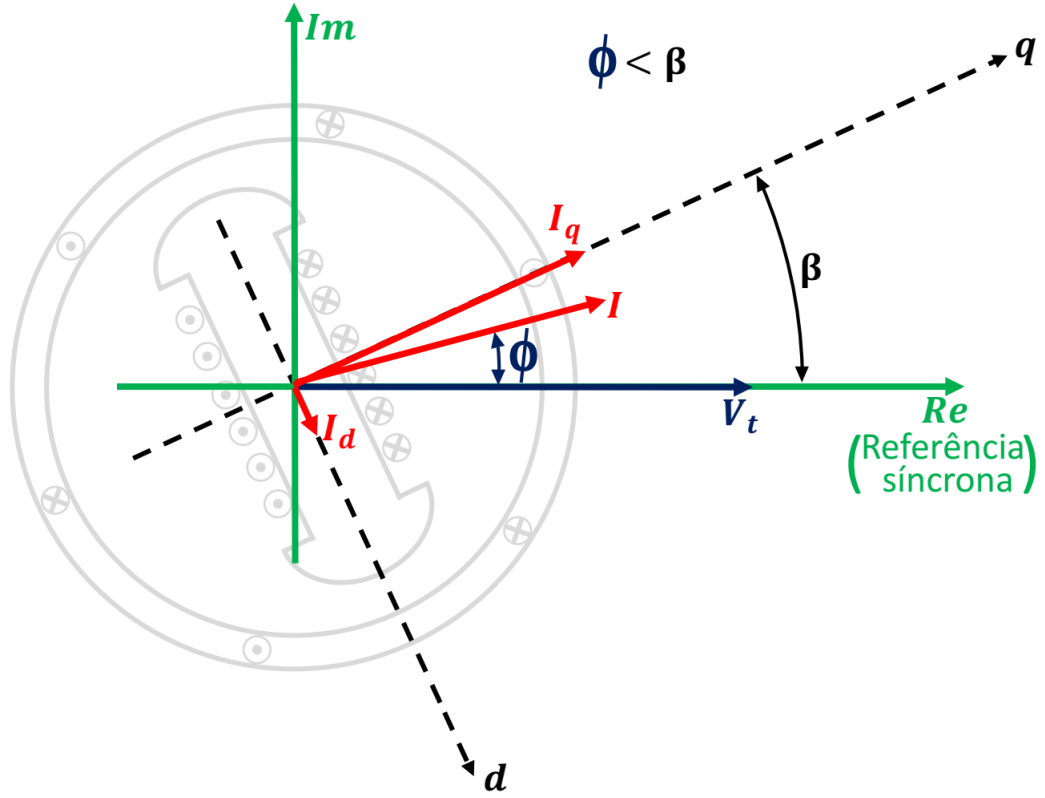


Figura 17: Diagrama fasorial da rejeição de carga do eixo arbitrário

O diagrama fasorial mostrado na Figura 17 ilustra um exemplo de situação de eixo arbitrário, onde atem-se uma potência reativa com a corrente I adiantada em relação à tensão terminal V_t e o valor do ângulo do fator de potência ϕ é menor que o ângulo de carga β .

4.3.1 Cálculo dos parâmetros

(BORTONI; JARDINI, 2002) propõe que o ângulo de carga seja aproximado utilizando a equação 4.15 no caso de testes em geradores síncronos de polos lisos, e depois de estimados os parâmetros referentes ao eixo direto como descrito no item 4.1, utilizar um método de otimização aplicado à equação 2.20. Também é proposto que as estimativas iniciais para a otimização reatância síncrona X_q e reatância transitória X'_q do eixo em quadratura podem ser aproximadas pelos valores análogos do eixo direto. O valor da estimativa inicial do ângulo de carga seja aproximado com a equação 4.15. Já o valor da estimativa inicial da constante de tempo subtransitória, sugere-se utilizar valores típicos de geradores de potência semelhante ao gerador em questão.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{P_0}{\left(\frac{U^2}{X_d} \right) - Q_0} \right) \quad (4.15)$$

Na equação 4.15 tem-se a potência ativa P_0 , a potência reativa Q_0 , a reatância síncrona do eixo direto X_d e a tensão de armadura imediatamente antes da rejeição.

4.3.1.1 Cálculo da constante de tempo subtransitória do eixo em quadratura T''_{qo}

O cálculo da constante de tempo subtransitória do eixo em quadratura T''_{qo} é realizado de forma análoga ao cálculo da constante de tempo subtransitória do eixo direto T''_{do} . Uma vez estimados os valores de todos os parâmetros do eixo direto, executa-se uma rejeição de carga do eixo arbitrário e utiliza-se a equação 2.20, inserindo os valores conhecidos. Mais uma vez a resposta da tensão é plotada em gráfico semi logaritmica e por meio do coeficiente angular da reta que melhor corresponde à curva é utilizado para encontrar o valor de T''_{q0} .

5 APLICAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os testes de rejeição de carga e a análise de sensibilidade de trajetória. O item 5.1 trata de testes simulados utilizando o *software* MATLAB[®] da *MathWorks*. Neste é realizada a estimação dos parâmetros dos eixos direto e em quadratura de uma simulação de um gerador síncrono apresentado no trabalho (BORTONI; JARDINI, 2002). Já o item 5.2 apresenta a estimação dos parâmetros do eixo direto de um gerador real com dados obtidos em laboratório.

5.1 Testes com dados simulados

Foi simulado o comportamento de um gerador síncrono com os dados nominais apontados na Tabela 1. Já a Tabela 2 traz os valores base utilizados nestes testes para normalização das unidades. Tomando-se por reais os parâmetros dinâmicos desse gerador como mostra a Tabela 3, foram realizados os ensaios de rejeição de carga do eixo direto e de rejeição do eixo arbitrário.

Tabela 1: Características nominais do gerador simulado

Característica	Valor
$S_N (3\phi)$	9375 KVA
U_N (linha)	13,8 KV
I_N (linha)	392 A
$\cos\varphi$	0,80
V_{campo}	125 V
I_{campo}	368 A
f	60 Hz

Tabela 2: Valores base do gerador simulado

Característica	Valor Base
S_b	9375 KVA
U_b	13,8 KV
I_b	392 A
Z_b	20,31 Ω

A impedância e corrente de base como $Z_b = \frac{(U_b)^2}{S_b}$ e $I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b}$, respectivamente.

Tabela 3: Parâmetros dinâmicos reais do gerador simulado

Parâmetro	Valor
X_d	1,1375 pu
X'_d	0,1876 pu
X''_d	0,1074 pu
T'_{d0}	4,9630 s
T''_{d0}	0,0222 s
X_q	1,0550 pu
X''_q	0,1492 pu
T'_{q0}	0,0740 s

5.1.1 Ensaio de rejeição do eixo direto

No ensaio de rejeição de eixo direto foi aplicada ao gerador uma carga puramente capacitiva, amostrados os dados referentes à corrente e à tensão, antes e depois da rejeição. Foi possível obter um valor de potência reativa, uma potência ativa nula e os valores de corrente e tensão imediatamente antes da rejeição, os quais seguem transcritos na Tabela 4. O comportamento da tensão de armadura após a rejeição segue ilustrado na Figura 18. Nesta, a tensão é senoidal com uma frequência alta. Deste modo, não é possível observar os detalhes da onda senoidal.

Tabela 4: Valores simulados imediatamente antes da rejeição do eixo direto

<i>Grandeza</i>	<i>Valor</i>
Q_0	-0,3125 pu
P_0	0 pu
U_0	0,972 pu
I_0	0,321 pu

Fazendo um tratamento dos dados contidos na Figura 18 através de um código do MATLAB[®], que encontra os picos da onda senoidal, foram obtidas as envoltórias superior e inferior da tensão de armadura e logo após concatenadas as duas envoltórias para obter uma maior quantidade de pontos. As envoltórias superior e inferior obtidas seguem mostradas na Figura 19 e a união dos módulos de ambas envoltórias segue mostrada na Figura 20, num intervalo de 0 até 20s, amostrado com uma frequência de 1kHz.

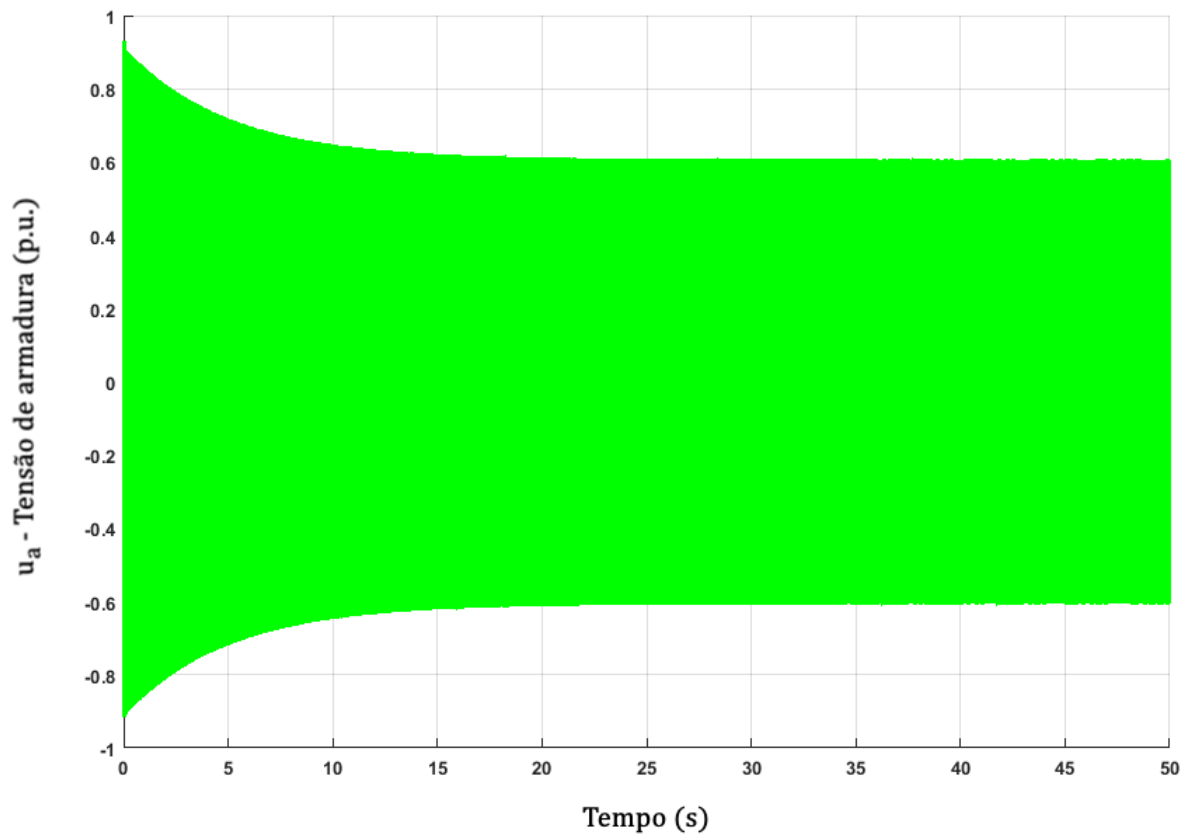


Figura 18: Tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto

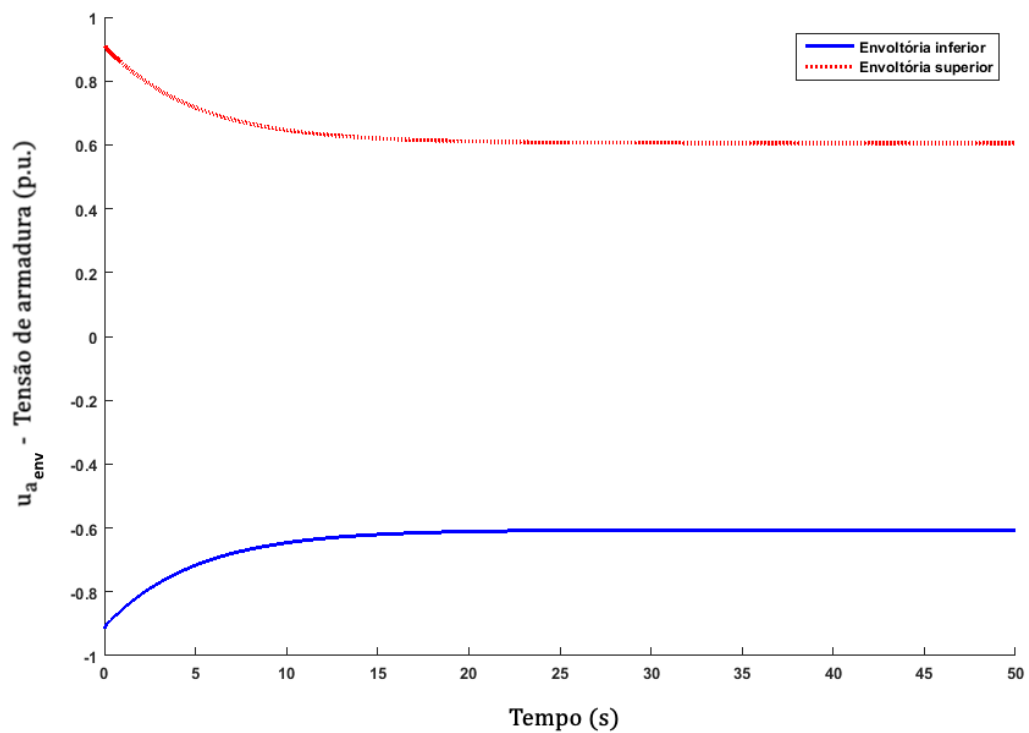


Figura 19: Envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto

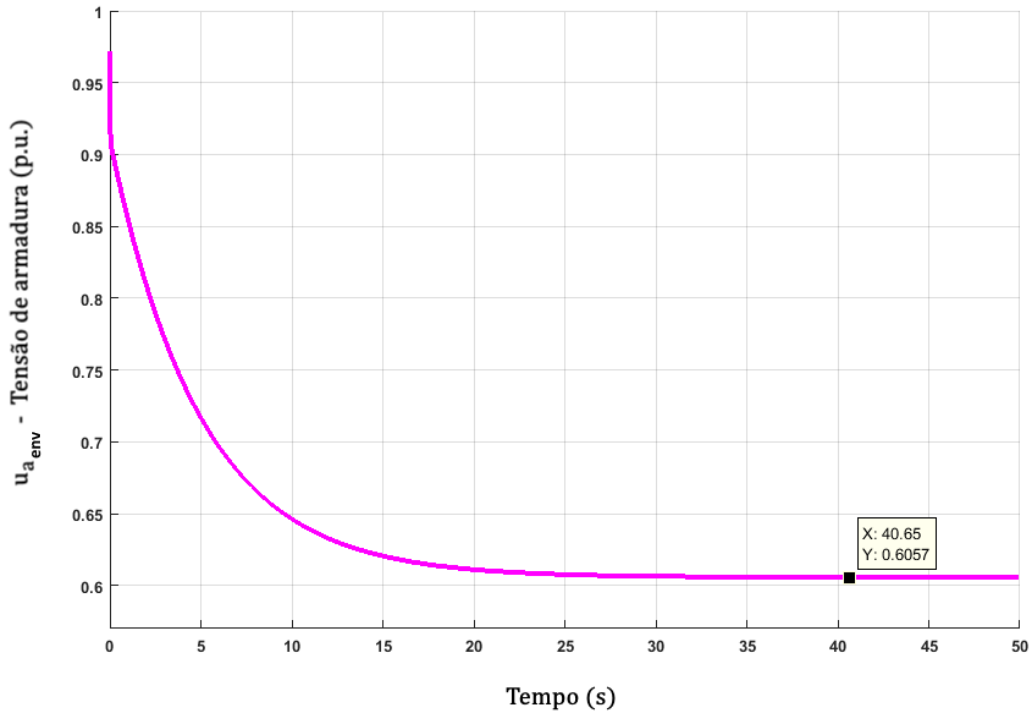


Figura 20: União das envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto

5.1.1.1 Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d

Observando a curva da Figura 20 é possível identificar quando o valor de tensão se estabiliza, caracterizando o regime permanente, com o valor $V_{q\infty} = 0,6057pu$. Então, por meio da equação 4.3 foi possível calcular o valor da reatância transitória do eixo direto X_d :

$$X_d = \frac{U - V_{q\infty}}{i_{d0}} = \frac{(0,972 - 0,6057)}{0,321} = \boxed{X_d = 1,1411pu}$$

5.1.1.2 Cálculo da reatância transitória do eixo direto X'_d e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T'_{d0}

Depois que foi identificado o valor da tensão no regime permanente é possível subtrair este valor da curva da tensão de armadura da Figura 20, obtendo assim a curva da Figura 21.

Tomando a curva da Figura 21 em escala semi logaritmica, foi possível obter a curva da Figura 22.

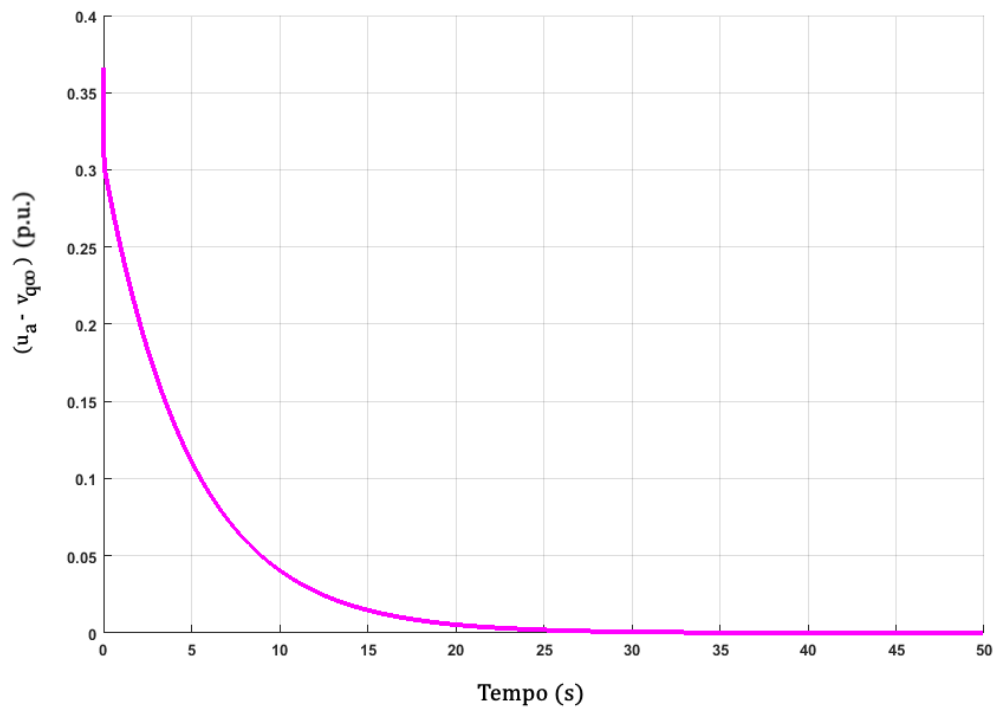


Figura 21: Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente

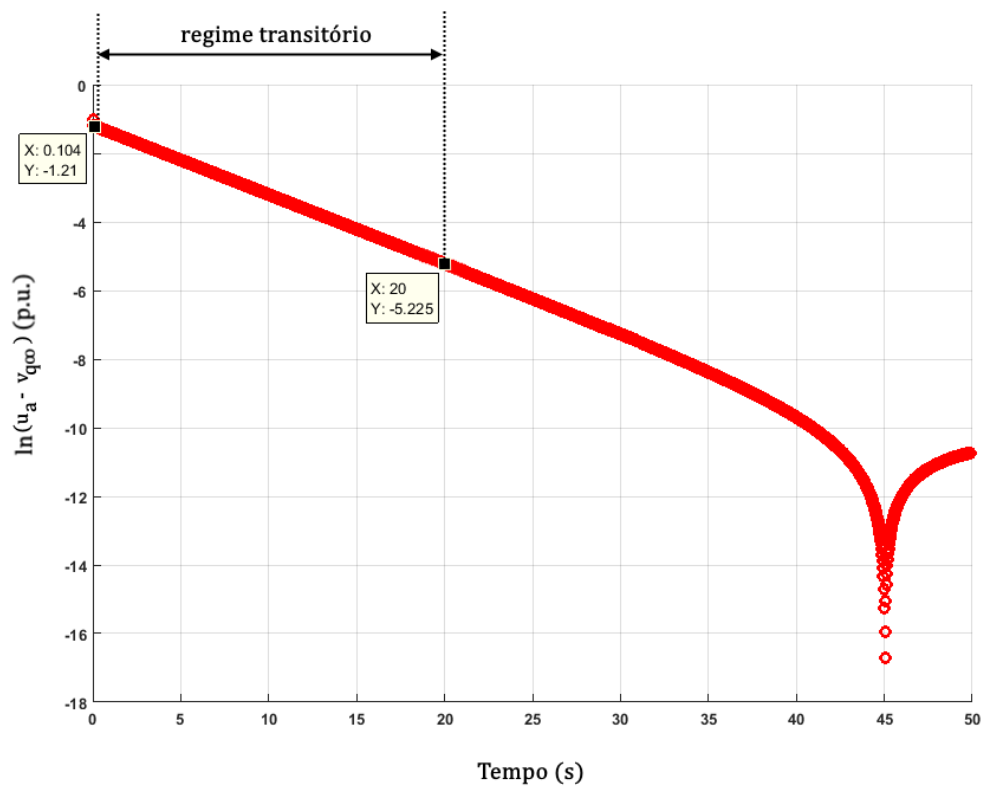


Figura 22: Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logarítmica

É possível notar na curva da Figura 22 que uma parte da curva trata-se de uma reta, que por sua vez, corresponde ao regime transitório. Também é possível observar nesta curva, uma queda acentuada perto do tempo de 45s.

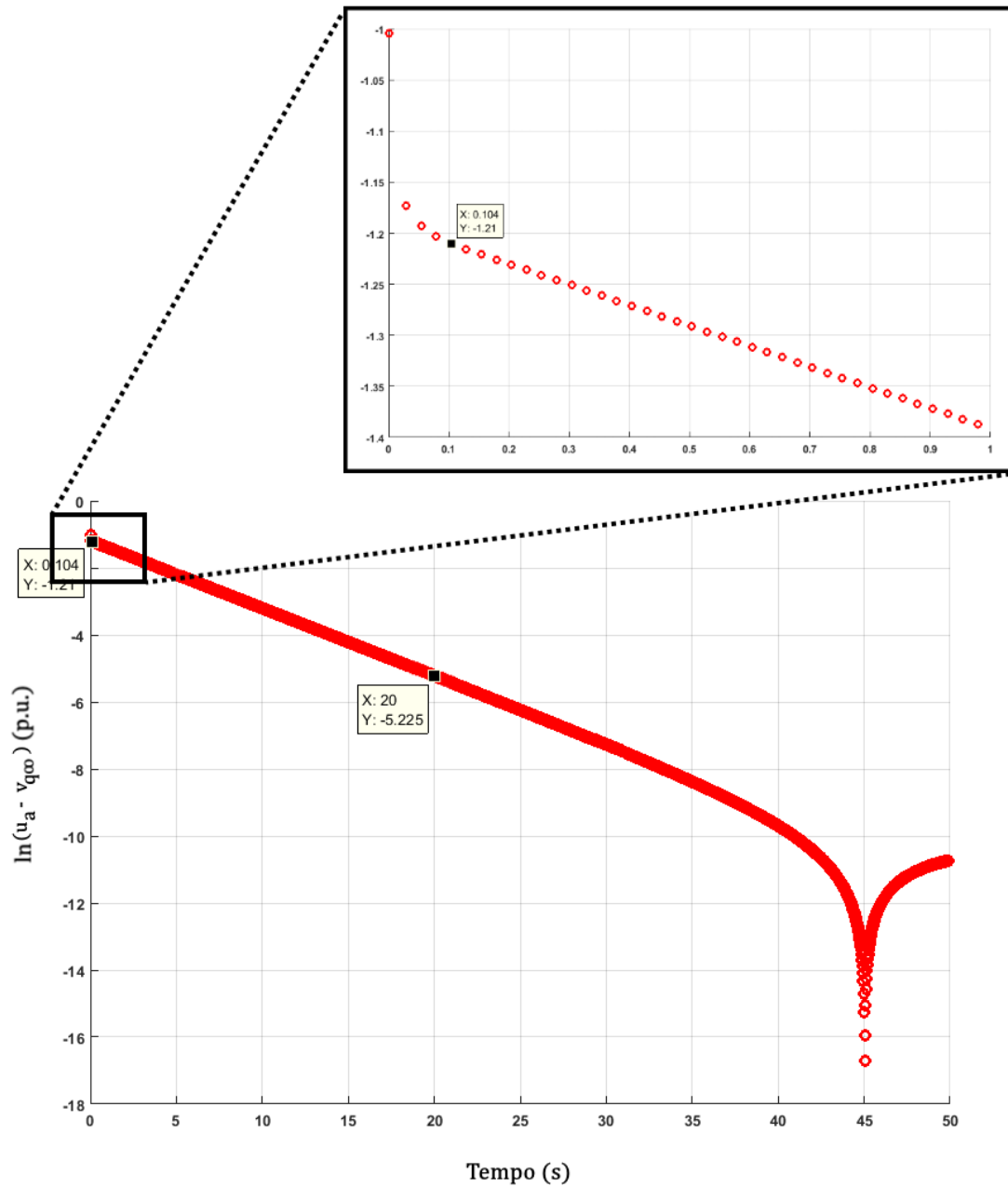


Figura 23: Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica e ampliação de 0 até 1s

Quando uma função puramente exponencial é plotada em um gráfico na escala semi logaritmica, esta se transforma em uma reta, porém quando esta mesma função não é exponencial pura, ou seja, há um valor constante somado à ela, é necessário primeiramente subtrair este valor constante antes de tomar a função na escala semi log. O valor constante a ser subtraído neste último caso, dificilmente é o valor exato, e por mais que se tente,

sempre haverá um erro em suas casas decimais. Daí a existência deste decaimento na curva observado no gráfico.

Ainda nesta curva, quando a mesma é observada de mais perto na região entre 0 até 1s, como pode ser visto em detalhes na Figura 23, notou-se uma pequena queda nos quatro primeiros pontos de amostragem. Então esta região de 0 até 0,104s foi considerado o regime subtransitório. Já o regime transitório foi considerado de 0,104s até 20s pois se trata da região mais reta.

Aplicando uma regressão linear na curva na região do regime transitório foi encontrada a melhor reta sobre este trecho, ilustrada na Figura 24. Os coeficientes angular m_1 e linear h_1 encontrados para a melhor reta correspondem à

$$m_1 = -0,2017$$

$$h_1 = -1,1887$$

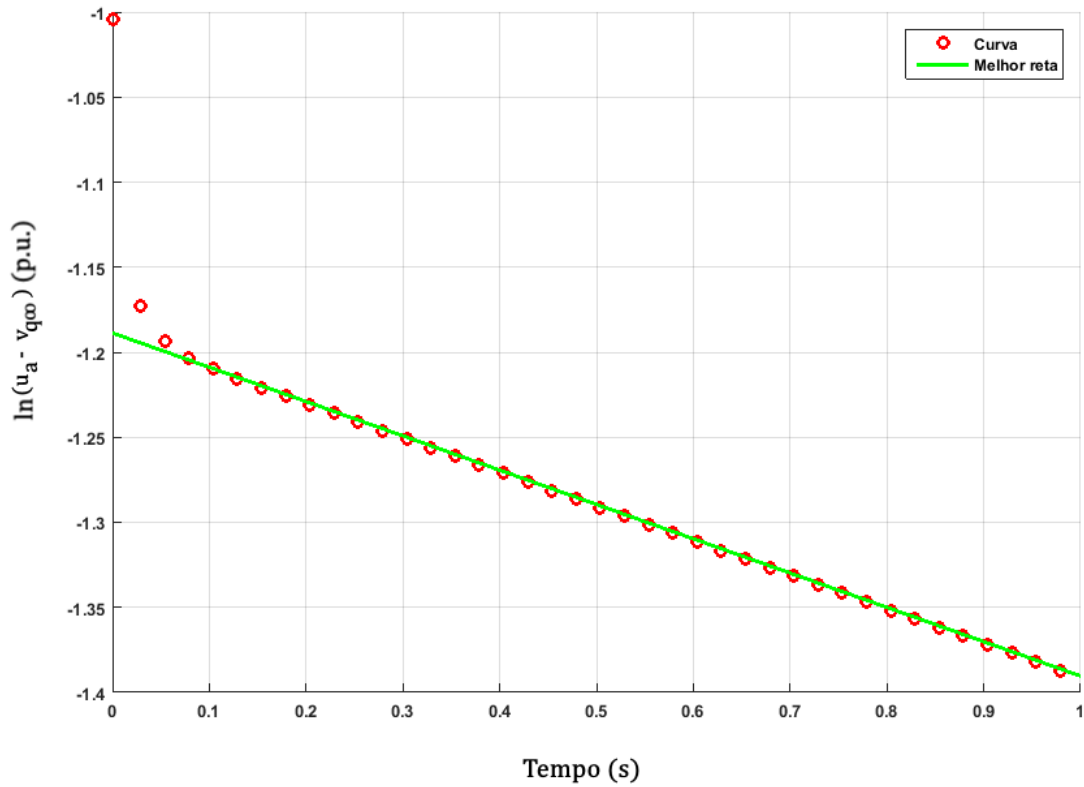


Figura 24: Melhor reta sobre o regime transitório

Os coeficientes angular e linear da melhor reta sobre o regime transitório permitem calcular os valores de V'_{q0} e X'_d por meio da equação 4.9 e também calcular T'_{d0} por meio da equação 4.8, respectivamente.

$$e^{h_1} = e^{-0,2017} = V'_{q0} = 0,3046$$

$$T'_{d0} = \frac{1}{-(m_1)} = \frac{1}{-(-0,2017)} = \boxed{T'_{d0} = 4,9579s}$$

$$X'_d = X_d - \frac{V'_{q0}}{i_{d0}} = 1,1411 - \frac{0,3046}{0,321} = \boxed{X'_d = 0,1921pu}$$

5.1.1.3 Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X''_d e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T''_{d0}

Depois que foi identificado o valor de V'_{q0} e T'_{d0} é possível subtrair a relação $(V'_{q0} \cdot e^{-t/T'_{d0}})$ da curva da Figura 21, obtendo assim uma nova curva, mostrada na Figura 25, contendo somente o regime subtransitório.

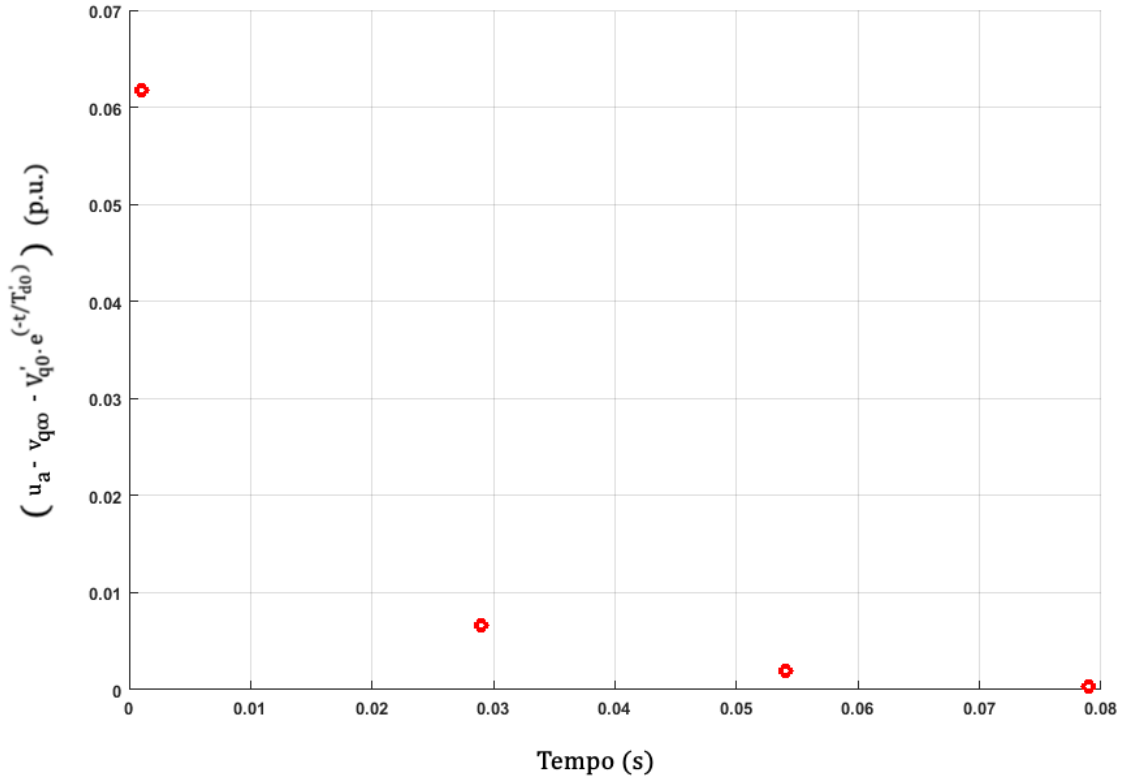


Figura 25: Curva da tensão no regime subtransitório da rejeição do eixo direto

Tomando-se a curva da Figura 25 em escala semi logarítmica e novamente aplicando uma regressão linear sobre a curva na região do regime subtransitório, foi encontrada a melhor reta sobre este trecho ilustrada na Figura 26. Os coeficiente angular m_2 e coeficiente linear h_2 encontrados para a melhor reta correspondem à

$$m_2 = -63,2895$$

$$h_2 = -2,8910$$

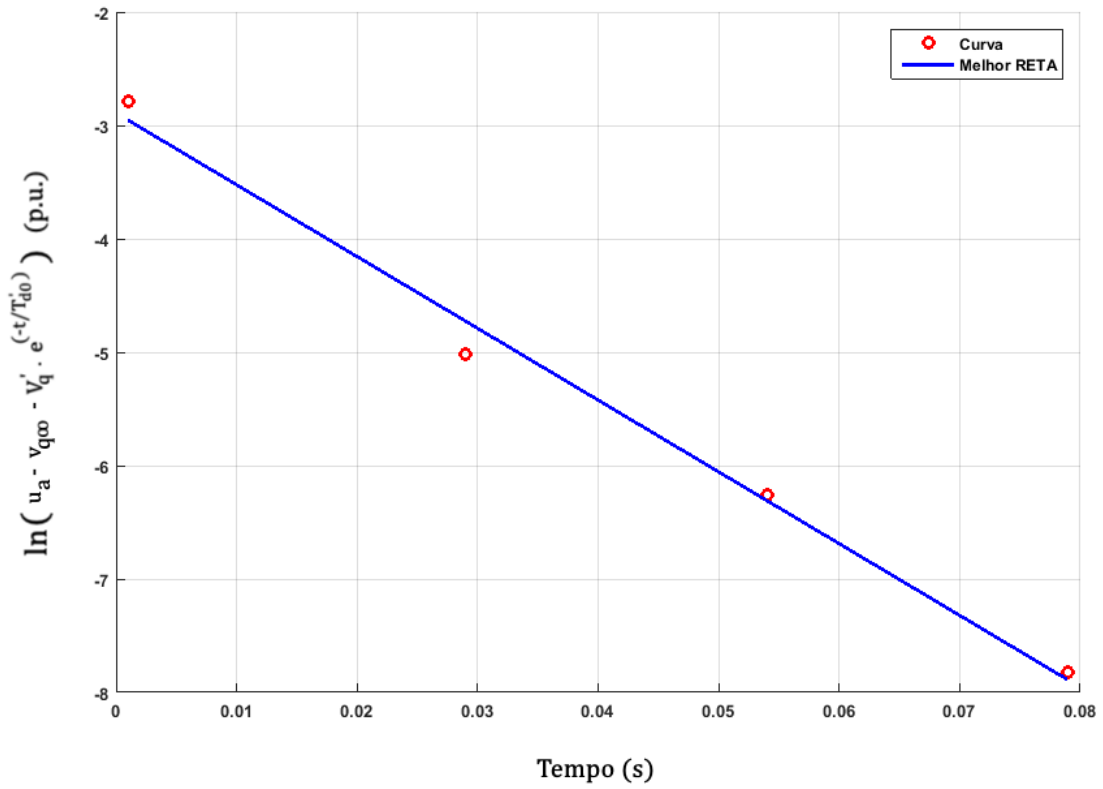


Figura 26: Melhor reta sobre o regime subtransitório

Os coeficientes angular e linear da melhor reta sobre o regime subtransitório permitem calcular o valor de V_{q0}'' e X_d'' por meio da equação 4.12 e também calcular T_{d0}' por meio da equação 4.11, respectivamente.

$$e^{h_2} = e^{-2,8910} = V_{q0}'' = 0,0555$$

$$T_{d0}'' = \frac{1}{-(m_2)} = \frac{1}{-(-63,2895)} = \boxed{T_{d0}'' = 0,0158s}$$

$$X_d'' = X_d - \frac{V_q''}{i_{d0}} = 0,1921 - \frac{0,0555}{0,321} = \boxed{X_d'' = 0,0192pu}$$

5.1.1.4 Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo direto

Os parâmetros calculados analiticamente no item 5.1.1.1, no item 5.1.1.2 e no item 5.1.1.3, foram aplicados como estimativas iniciais no algoritmo do método de sensibilidade de trajetória para que pudessem ser otimizados, ou seja, convergirem para os valores mais próximos possíveis do sistema real.

O modelo matemático utilizado no algoritmo foi a equação 2.21. Adotando uma tolerância de $1 \cdot 10^{-10}$, o algoritmo convergiu após três iterações como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5: Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo direto

	X_d [pu]	X'_d [pu]	T'_{d0} [s]	X''_d [pu]	T''_{d0} [s]	$J(p)$
Estimativas iniciais	1,1411	0,1902	4,9576	0,0192	0,0158	$1,4644 \cdot 10^{-5}$
depois da 1ª iteração	1,0583	0,1870	4,4961	0,1090	0,0185	$2,2570 \cdot 10^{-7}$
depois da 2ª iteração	1,1105	0,1876	4,8056	0,1079	0,0221	$5,7554 \cdot 10^{-10}$
depois da 3ª iteração	1,1366	0,1876	4,8053	0,1074	0,0222	$1,4014 \cdot 10^{-14}$

Assim, alcançou-se valores de convergência dos parâmetros estimados para o eixo direto, apontados na Tabela 6. Já a Figura 27 mostra a resposta da tensão de armadura do eixo direto do sistema com os parâmetros com as estimativas iniciais e os parâmetros estimados finais.

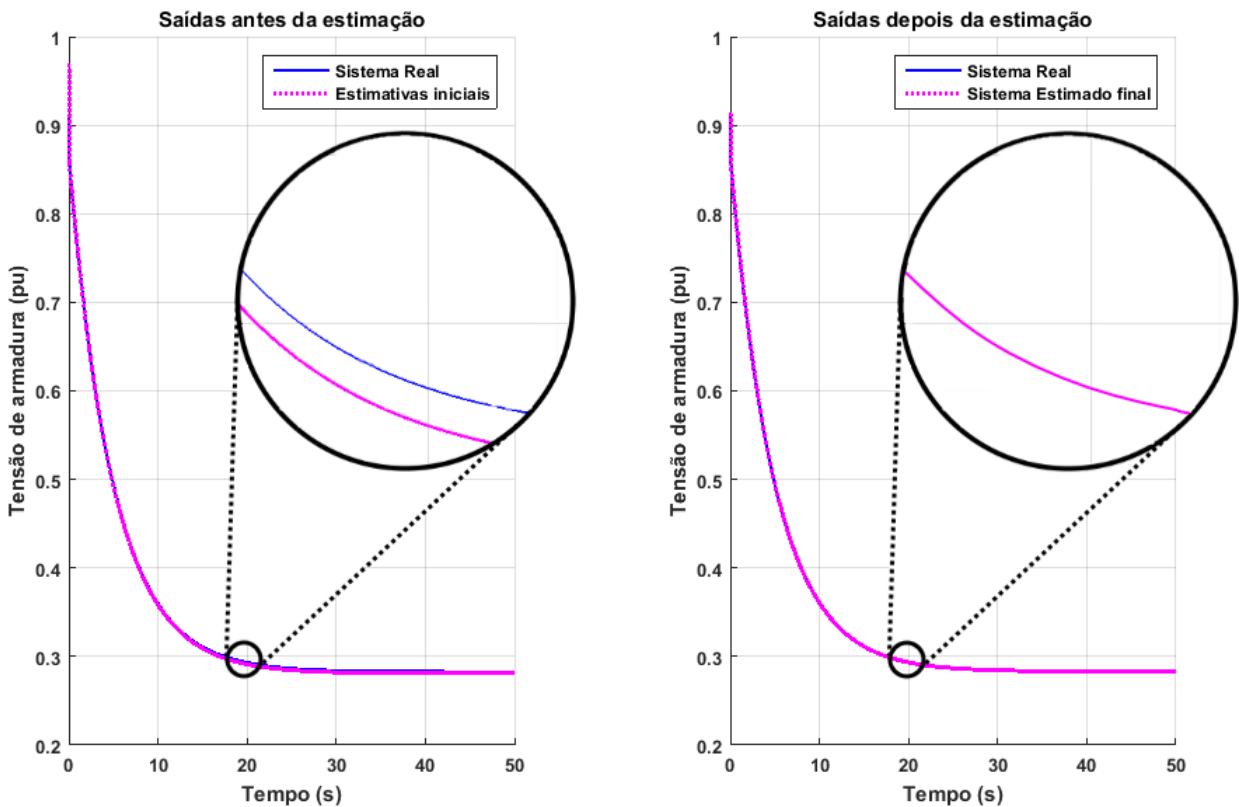


Figura 27: Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo direto

Tabela 6: Parâmetros finais da estimação do eixo direto comparados com os reais

Parâmetro	Valor Estimado	Valor Real	Erro de estimação
X_d	1,1366 pu	1,1375 pu	0,07%
X'_d	0,1876 pu	0,1876 pu	0%
T'_{d0}	4,9603 s	4,9653 s	0,1%
X''_d	0,1074 pu	0,1074 pu	0%
T''_{d0}	0,0222 s	0,0222 s	0%

5.1.2 Ensaio de rejeição do eixo em quadratura

No ensaio de rejeição de eixo em quadratura deve-se chegar à uma situação em que o ângulo do fator de potência ϕ seja igual ao ângulo de carga β . Porém na prática essa situação não é tão simples de se atingir, logo não foi simulada essa situação.

Uma alternativa para encontrar os parâmetros referentes ao eixo em quadratura é realizar o ensaio de rejeição do eixo arbitrário, utilizando a equação 2.20 e inserindo como constantes os valores dos parâmetros já estimados no eixo direto.

5.1.3 Ensaio de rejeição do eixo arbitrário

No ensaio de rejeição de eixo arbitrário foi aplicada uma carga capacitiva e resistiva juntas, amostrados os dados referentes à corrente e tensão antes e depois da rejeição. Isso fez com que fosse obtida uma potência reativa, uma potência ativa e os valores de corrente e tensão imediatamente antes da rejeição, os quais seguem transcritos na Tabela 7. O comportamento da tensão de armadura após a rejeição segue ilustrando na Figura 28. Novamente a tensão senoidal com uma frequência alta. Deste modo o não é possível observar os detalhes da onda senoidal.

Tabela 7: Valores simulados imediatamente antes da rejeição do eixo arbitrário

Grandeza	Valor
Q_0	-0.189 pu
P_0	0,300 pu
U_0	0,970 pu
I_0	0,365 pu

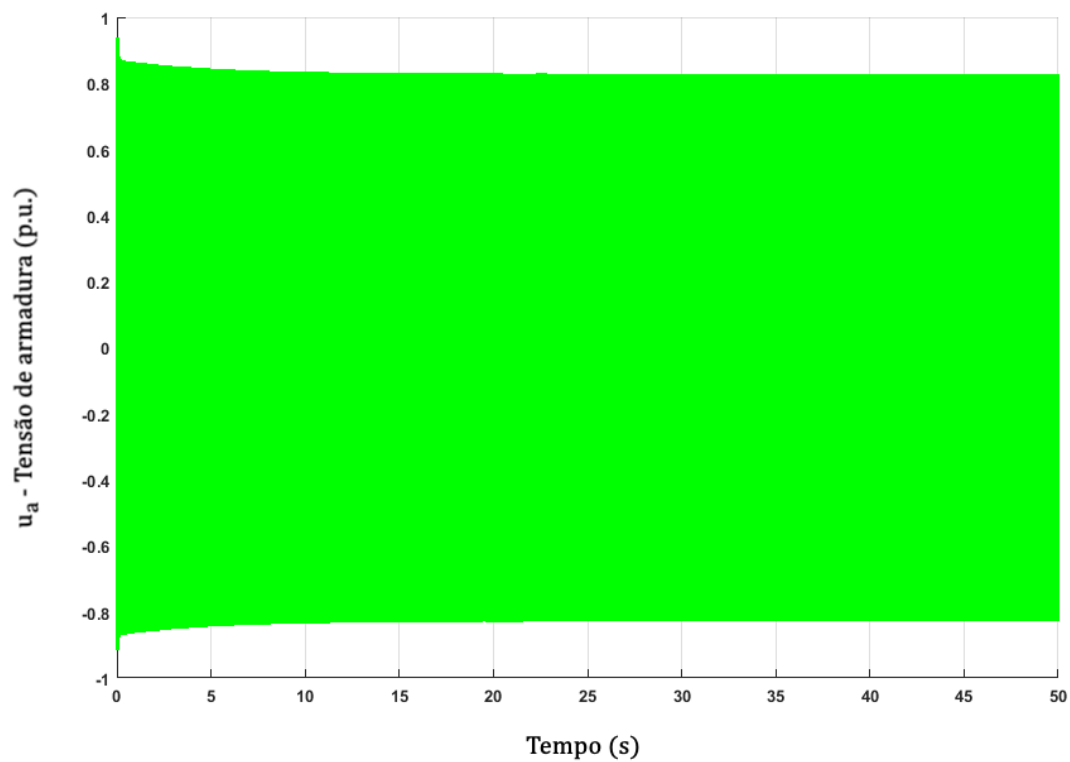


Figura 28: Tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo em quadratura

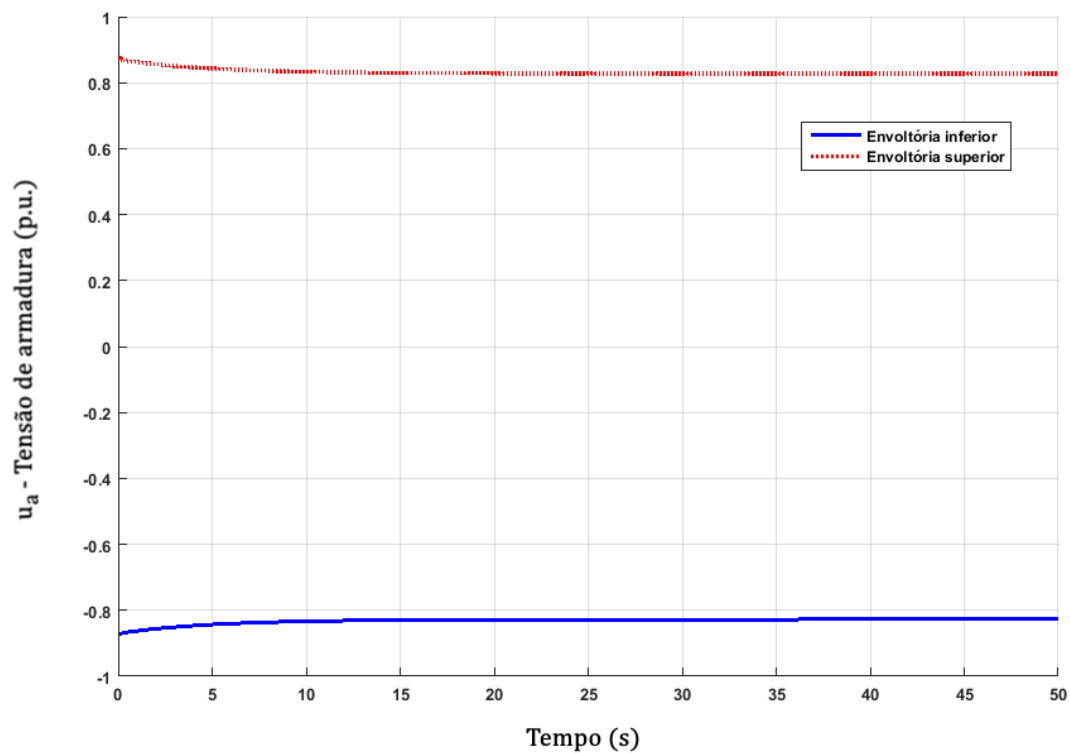


Figura 29: União das envoltórias superior e inferior da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo arbitrário

Fazendo um tratamento dos dados contidos na Figura 28 através de um código do MATLAB[®] que encontra os picos da onda senoidal, foram obtidas as envoltórias superior e inferior da tensão de armadura e logo após concatenadas as duas envoltórias para obter uma maior quantidade de pontos. As envoltórias superior e inferior obtidas seguem mostradas na Figura 29 e a união dos módulos de ambas envoltórias segue mostrada na Figura 30.

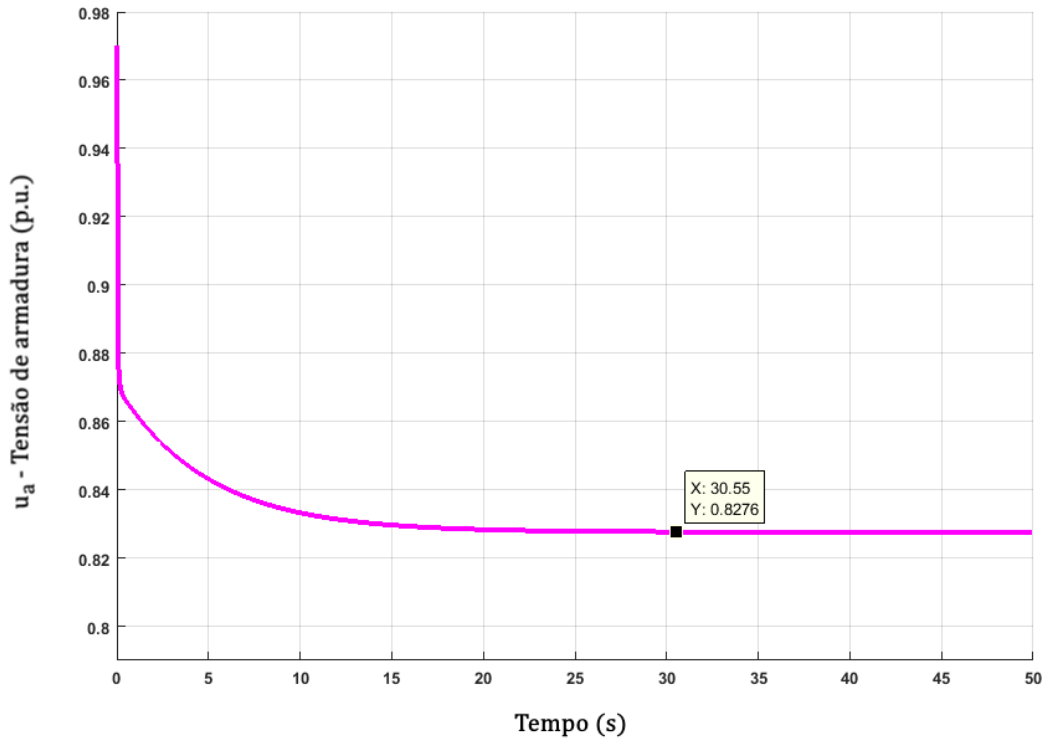


Figura 30: Envoltória da tensão de armadura após a rejeição de carga do eixo arbitrário

5.1.3.1 Cálculo do valor aproximado do ângulo de carga β

Utilizando a equação 4.15, calculou-se o valor aproximado do ângulo de carga. Aconselha-se sempre utilizar um ângulo de carga próximo do fator de potência, pois dessa forma o gerador estará trabalhando numa situação próxima ao eixo em quadratura, favorecendo a estimação dos parâmetros do respectivo eixo.

Com base nos valores referentes a rejeição do eixo arbitrário contidos na Tabela 7, foi calculado um valor aproximado de β . Este valor de β é utilizado somente como uma estimativa inicial para o método de sensibilidade de trajetória, que por sua vez necessita de um valor inicial para cada parâmetro.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{0,300}{\left(\frac{0,970^2}{1,1375} \right) - 0,189} \right) = \boxed{\beta = 25,13^\circ}$$

5.1.3.2 Cálculo da reatância síncrona do eixo em quadratura X_q , da reatância subtransitória do eixo em quadratura X_q'' e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto do eixo em quadratura T_{q0}''

Os valores dos parâmetros X_q , X_q'' e T_{q0}'' foram estimados utilizando o método de sensibilidade de trajetória. Portanto foi necessário a atribuição de estimativas iniciais.

As estimativas iniciais adotadas para X_q e X_q'' foram os mesmos valores referentes ao eixo direto, ou seja, $X_q \approx X_d$ e $X_q'' \approx X_d''$. Já para o valor de estimativa inicial de T_{q0}'' foi utilizado um valor típico para geradores de baixa potência $T_{q0}'' = 0,05s$ (BORTONI; JARDINI, 2002). Logo:

$$X_d \approx \boxed{X_q = 1,1366pu}$$

$$X_d'' \approx \boxed{X_q'' = 1,1074pu}$$

$$\boxed{T_{q0}'' = 0,05s}$$

Com base nos valores de potência contidos na Tabela 7 calculou-se o ângulo do fator de potência ϕ :

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_0}{P_0} \right) = \frac{-0,189}{0,300} = \boxed{\phi = 32,20^\circ}$$

5.1.3.3 Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo em quadratura

As estimativas iniciais obtidas no item 5.1.3.1 e no item 5.1.3.2 foram aplicados como parâmetros iniciais no algoritmo do método de sensibilidade de trajetória para que os mesmos pudessem ser otimizados. O modelo matemático utilizado no algoritmo corresponde à equação 2.20. Os parâmetros referentes ao eixo direto $[X_d, X_d', T_{d0}', X_d'', T_{d0}'']$ encontrados anteriormente, foram consideradas como constantes.

Por fim, adotando uma tolerância de $1 \cdot 10^{-10}$, o algoritmo convergiu após três iterações, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8: Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo em quadratura

	X_q [pu]	X_q'' [pu]	T_{q0}'' [s]	β [°]	$J(p)$
Estimativas iniciais	1,1375	0,1074	0,0500	25,13	$9,7642 \cdot 10^{-5}$
depois da 1ª iteração	1,0591	0,1843	0,0699	23,22	$4,4516 \cdot 10^{-6}$
depois da 2ª iteração	1,0550	0,1499	0,0741	23,10	$9,1359 \cdot 10^{-10}$
depois da 3ª iteração	1,0550	0,1492	0,0740	23,10	$3,5152 \cdot 10^{-15}$

Assim alcançou-se os valores de convergência dos parâmetros estimados para o eixo em quadratura apontados na Tabela 9. Já a Figura 31 mostra a resposta da tensão de armadura do eixo arbitrário do sistema com as estimativas iniciais e os parâmetros estimados finais.

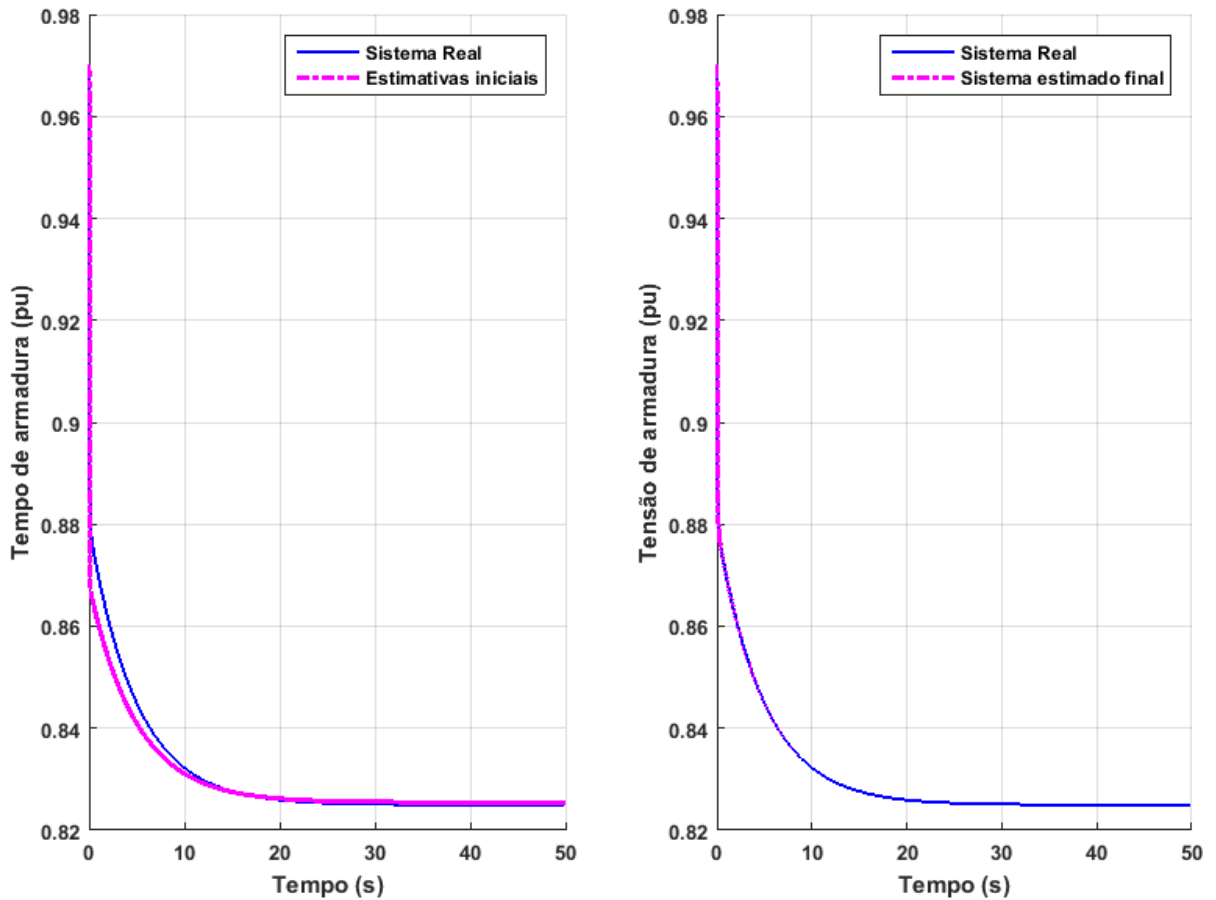


Figura 31: Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo arbitrário

Tabela 9: Parâmetros finais da estimação do eixo em quadratura comparados com os reais

Parâmetro	Valor Estimado	Valor Real	Erro de estimação
X_q	1,0550 pu	1,0550 pu	0%
X_q''	0,1499 pu	0,1492 pu	0,4%
T_{q0}	0,0740 s	0,0740 s	0%
β	23,10°	23,10°	0%

5.2 Testes com dados reais obtidos em laboratório

Os testes com dados reais foram realizados no Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

O Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas é formado basicamente por uma mesa com um computador junto à kits de aquisição de dados e por duas bancadas: uma delas contendo uma máquina de corrente contínua acoplada à uma máquina síncrona e outra formada por uma máquina de corrente contínua e, diferentemente da primeira, acoplada à uma máquina assíncrona. As bancadas são divididas em bancada 1 e bancada 2 e estas são compostas por autotransformadores variadores e por pontes retificadoras.

A Figura 32 mostra a bancada 1, utilizada nos testes práticos deste trabalho, composta por uma máquina de corrente contínua que simulará uma turbina, aplicando uma rotação no gerador síncrono.



Figura 32: Foto da bancada do Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas composta por uma máquina de corrente contínua e um gerador síncrono

Já a Figura 33 ilustra o esquemático do Laboratório de TCC em Máquinas Elétricas onde foram realizados os testes.

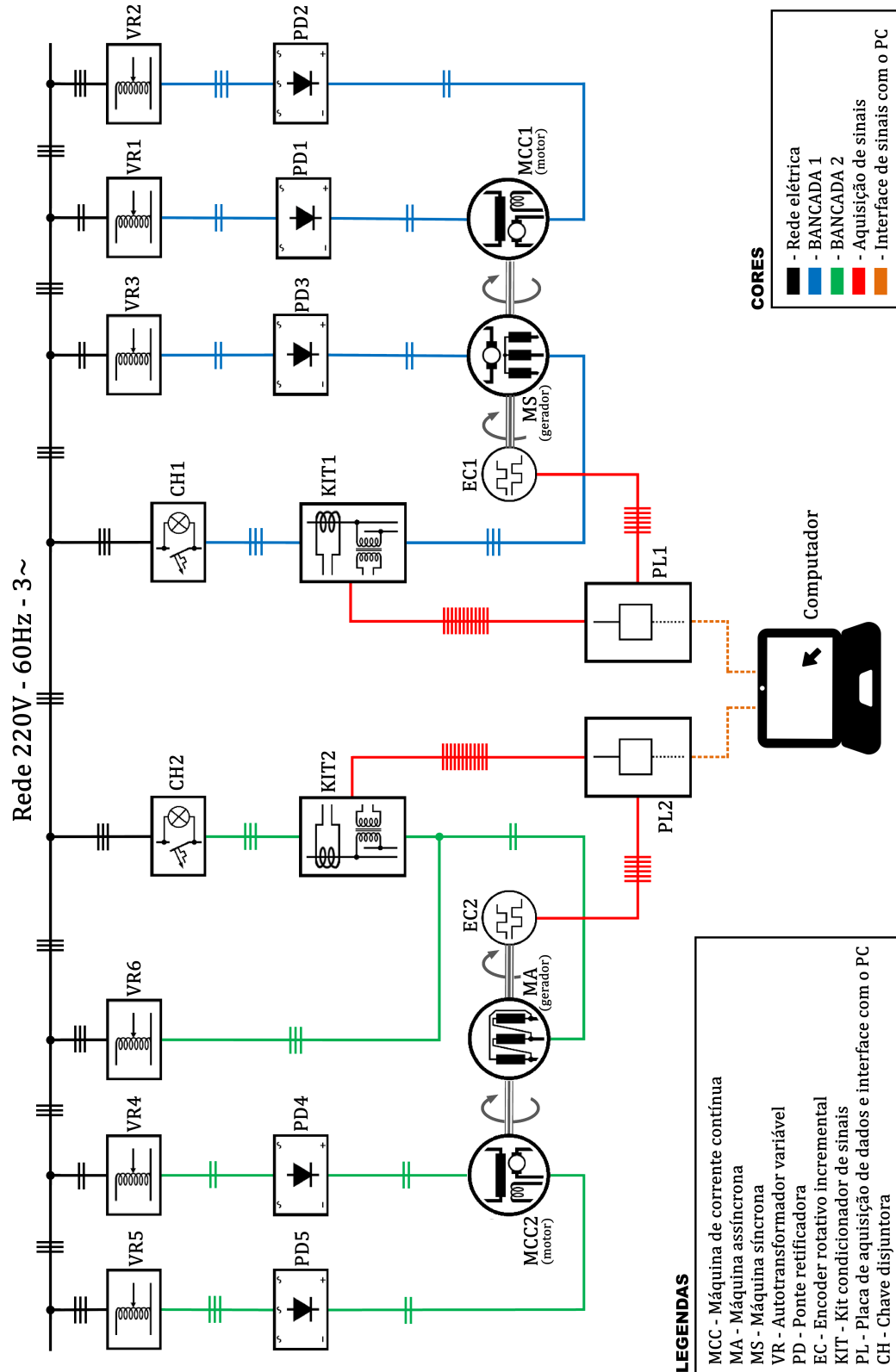


Figura 33: Esquemático unifilar do Laboratório de TCC em Máquinas da EESC-USP

O gerador síncrono que foi submetido aos testes tem as características nominais apontadas na Tabela 10. Já os valores base do gerador são transcritos na Tabela 11.

Tabela 10: Características nominais do gerador real

Característica	Valor
S_N	2 kVA
U_N	220 V
I_N	5 A
$\cos\varphi$	0,80
V_{campo}	220 V
I_{campo}	0,6 A
f	60 Hz
ω	1800 RPM

Tabela 11: Características nominais do gerador real

<i>Característica</i>	<i>ValorBase</i>
S_b	2 kVA
U_b	220 V
I_b	5,24 A
Z_b	24,19 Ω

5.2.1 Ensaio de rejeição do eixo direto

No ensaio de rejeição de eixo direto foi aplicada uma carga puramente capacitiva, amostrados os dados referentes à corrente e tensão antes e depois da rejeição como ilustrado no esquemático da Figura 34. Isso fez com que fosse obtida potência reativa, uma potência ativa nula e os valores de corrente e tensão imediatamente antes da rejeição, os quais seguem transcritos na Tabela 12.

Tabela 12: Valores medidos imediatamente antes da rejeição do eixo direto

<i>Grandeza</i>	<i>Valor</i>
Q_0	-0,570 pu
P_0	0 pu
U_0	0,9792 pu
I_0	0,583 pu

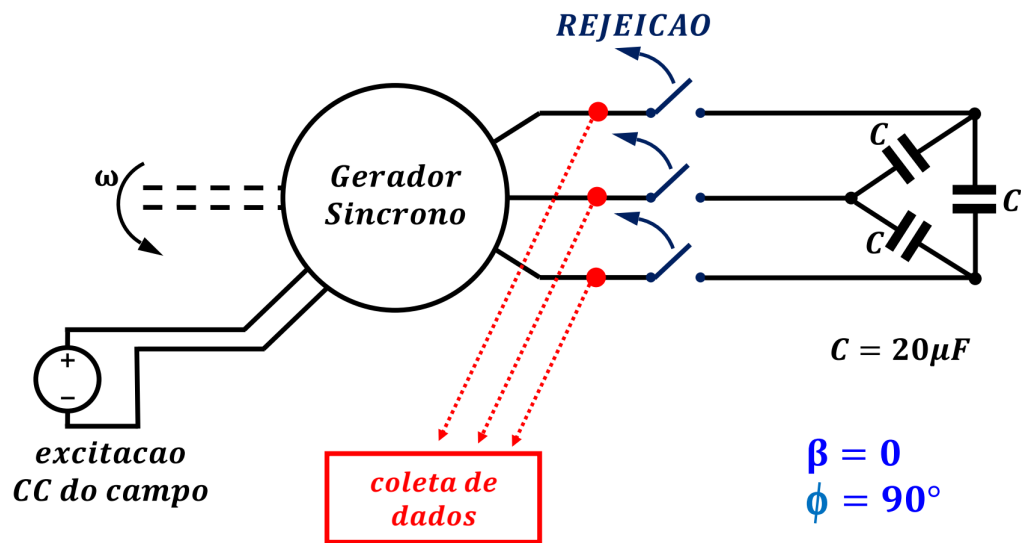


Figura 34: Esquemático de rejeição do eixo direto do ensaio prático

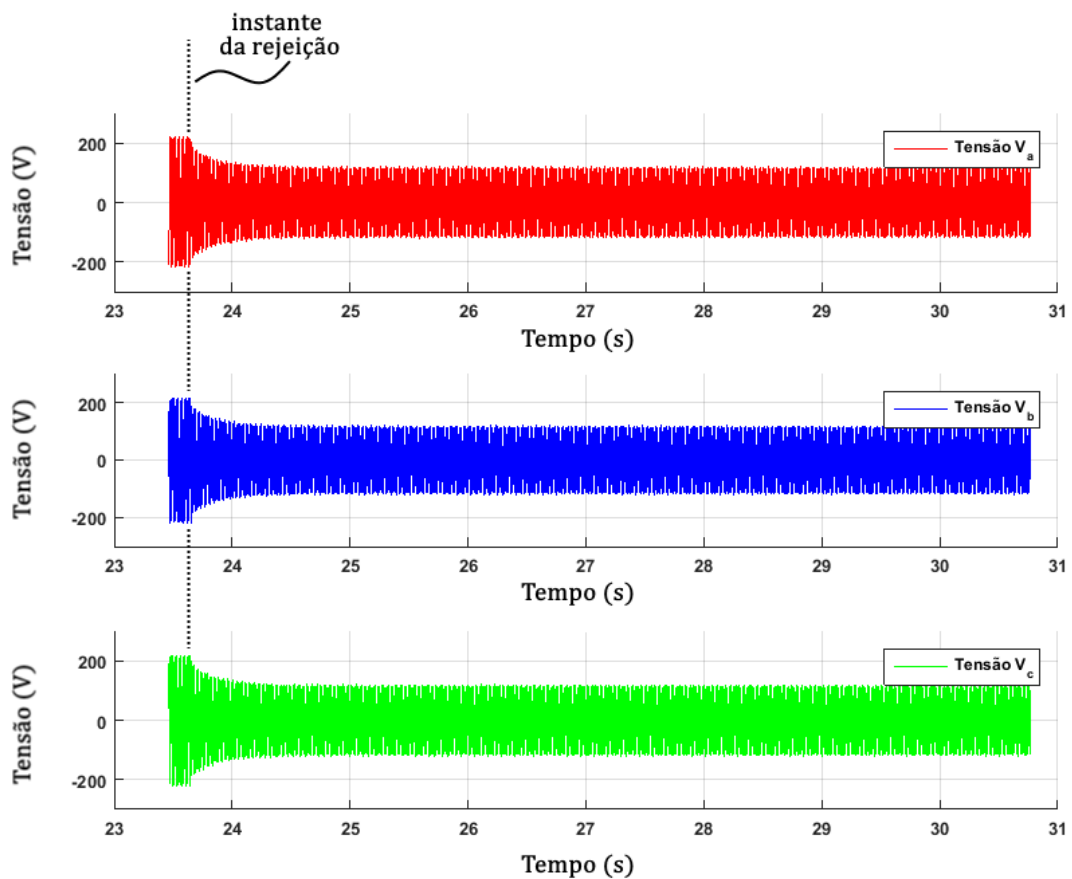


Figura 35: Tensão de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo direto

O comportamento da tensão de armadura em cada fase (em V) após a rejeição segue mostrado na Figura 35 e o comportamento da corrente (em A), na Figura 36.

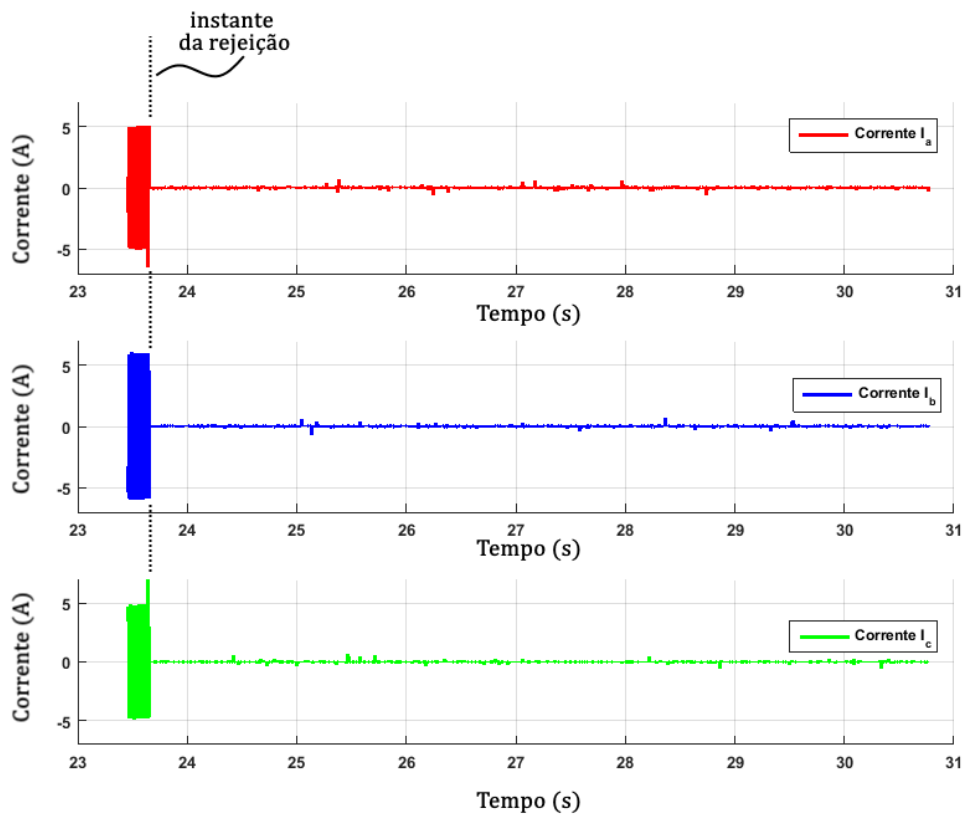


Figura 36: Corrente de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo direto

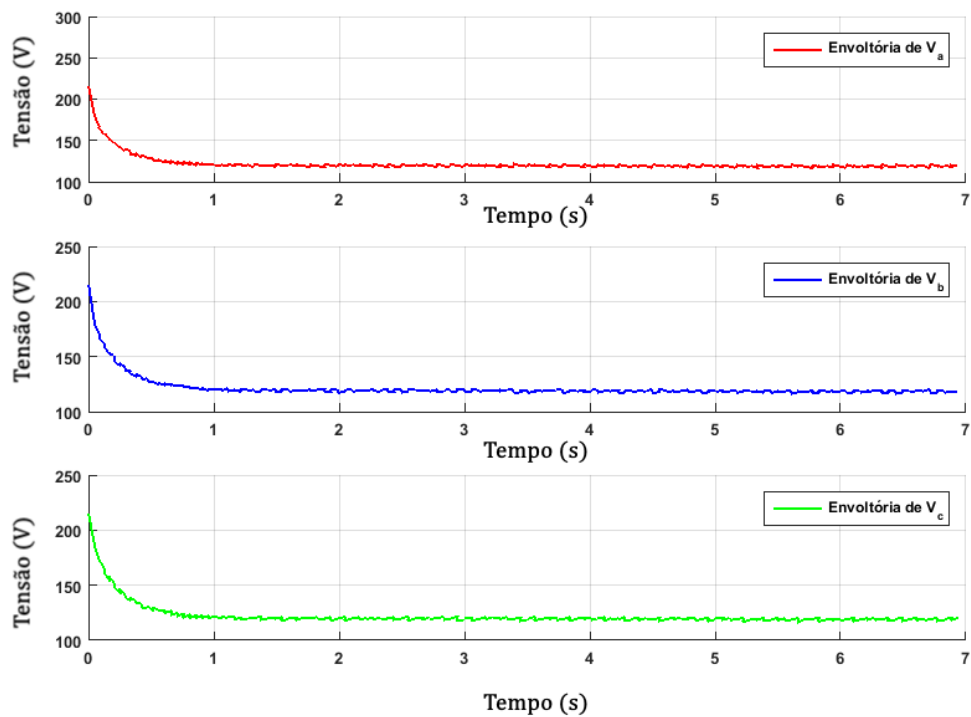


Figura 37: Envoltórias das tensão medida de cada fase após a rejeição do eixo direto

Fazendo um tratamento dos dados contidos na Figura 35 através de um código do MATLAB[®], que encontra as envoltórias superior e inferior da tensão de armadura foram obtidas as envoltórias superior e inferior da tensão de armadura e logo após concatenadas as duas envoltórias de cada fase para obter uma maior quantidade de pontos. As envoltórias das tensões de armadura para cada fase seguem mostradas na Figura 37. Já a Figura 38 mostra a média entre as envoltórias das três tensões com seu valor em Volts.

Normalizando a envoltória da Figura 38 obtém-se a média das envoltórias em p.u. assim como mostrado na Figura 39.

Um importante detalhe a respeito do teste de rejeição de carga é que ele pode ser realizado de forma isolada da rede elétrica (*off-line*) ou ligado à rede elétrica (*on-line*). Quando o teste é realizado (*off-line*) é possível observar um aumento da velocidade de rotação do gerador logo após a rejeição de carga. Por outro lado, quando o gerador permanece ligado à rede elétrica, não há essa alteração de velocidade.

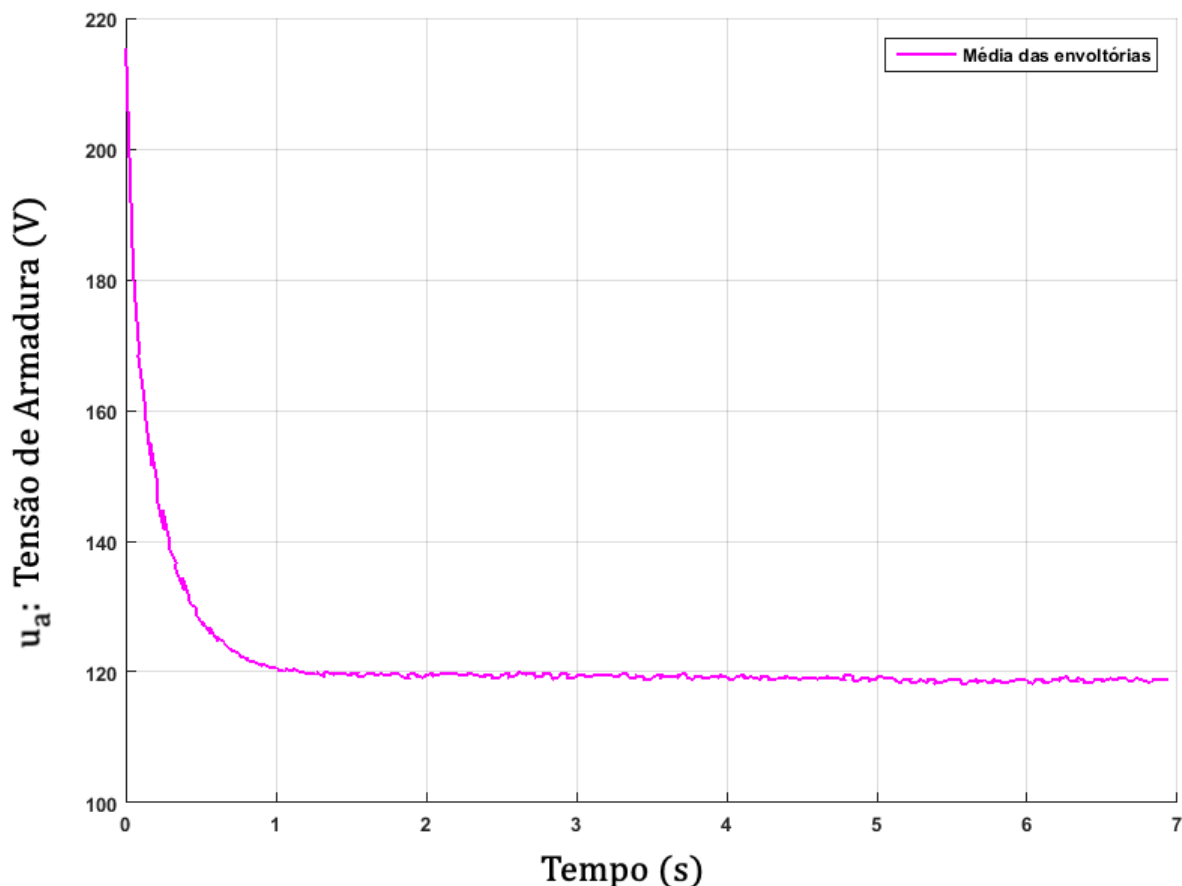


Figura 38: Média das envoltórias de tensão medidas das três fases das tensão após a rejeição do eixo direto (em V)

O teste prático deste trabalho foi realizado no modo (*off-line*), logo houve um

aumento na velocidade de rotação do gerador após a rejeição. Consequentemente, também houve um aumento na tensão de armadura e uma propagação dessa taxa de erro nos parâmetros calculados posteriormente, como por exemplo, nos parâmetros X_d , X'_d , T'_{d0} , e assim por diante.

Uma maneira de resolver esse pequeno problema seria dividir a tensão de armadura medida no modo *off-line* por um fator referente ao aumento da velocidade. Contudo, não foi possível monitorar a velocidade de rotação do gerador devido à problemas técnicos no laboratório. Diante disso os parâmetros estimados podem apresentar uma pequena alteração de seu valor final.

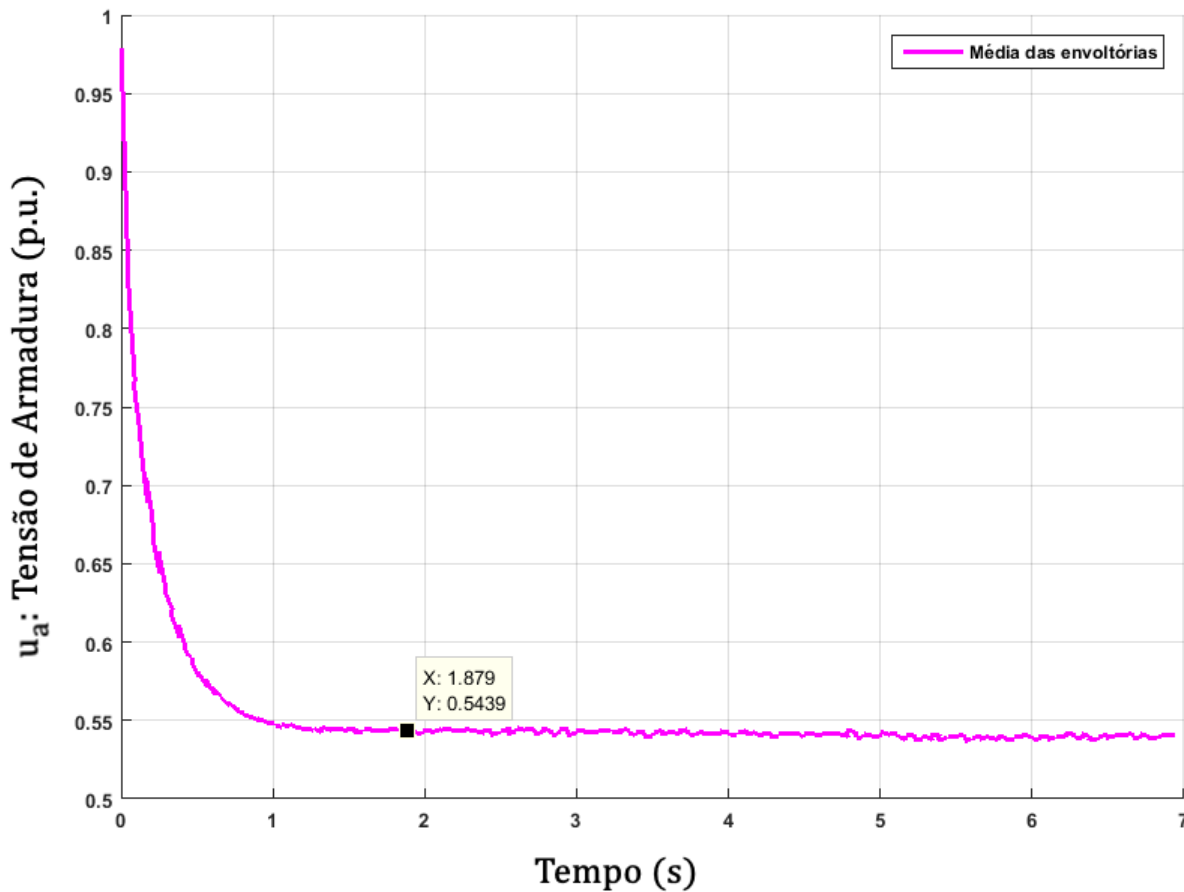


Figura 39: Média das envoltórias das tensões das três fases após a rejeição do eixo direto (em pu)

5.2.1.1 Cálculo da reatância síncrona do eixo direto X_d

Observando a curva da Figura 39 é possível identificar quando o valor de tensão se estabiliza, caracterizando o regime permanente, com o valor de $V_{q\infty} = 0,5439pu$. Então, por meio da equação 4.3 foi possível calcular o valor da reatância transitória do eixo direto X_d :

$$X_d = \frac{U - V_{q\infty}}{i_{d0}} = \frac{(0,9792 - 0,5439)}{0,583} = \boxed{X_d = 0,746pu}$$

5.2.1.2 Cálculo da reatância transitória do eixo direto X'_d e da constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto T'_{d0}

Depois que foi identificado o valor da tensão no regime permanente é possível subtrair este valor da curva da tensão de armadura da Figura 39, obtendo assim a curva da Figura 40.

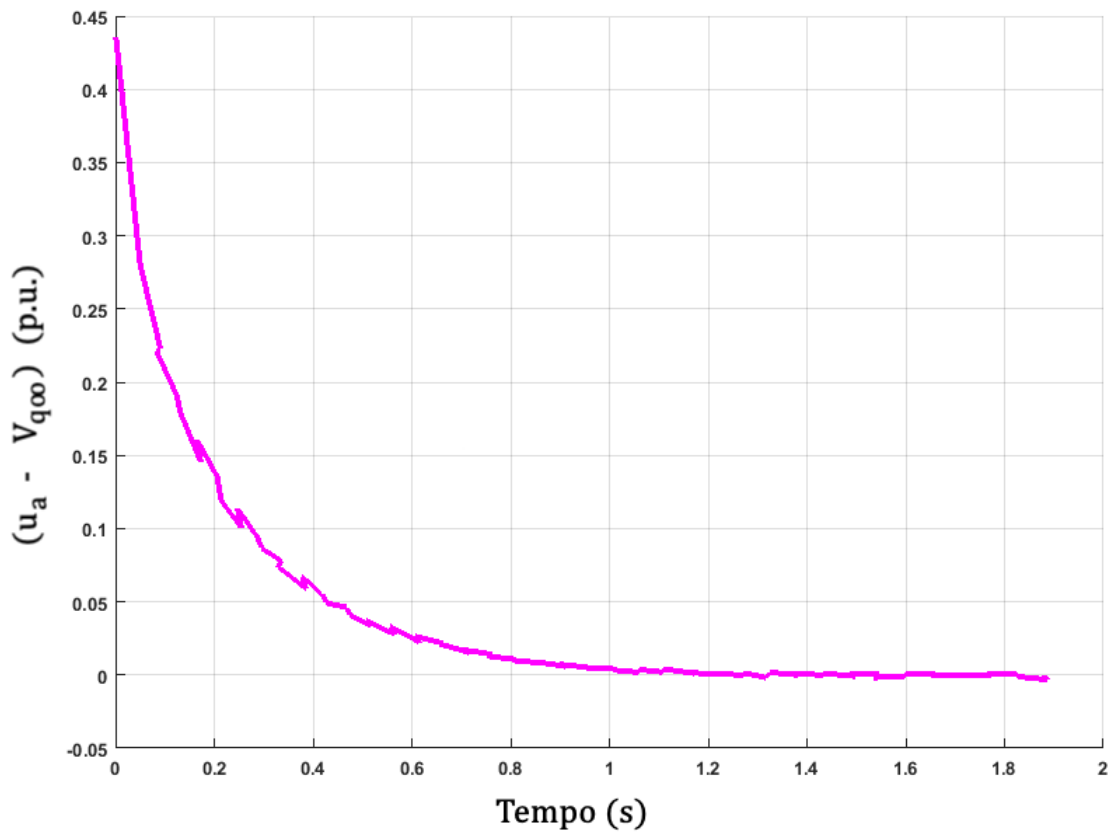


Figura 40: Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente

Tomando a curva da Figura 40 em escala semi logaritmica, foi obtida a curva da Figura 41.

É possível notar na curva da Figura 41 que parte dela trata-se de uma reta, que por sua vez, corresponde ao regime transitório. Quando essa curva é observada de mais perto na região entre 0 e 0,6s, como pode ser visto na Figura 42, nota-se uma pequena queda nos três primeiros pontos de amostragem. Então esta região de 0 até 0,091s foi considerada em regime subtransitório. Já o regime transitório foi considerado de 0,091s até 0,901s.

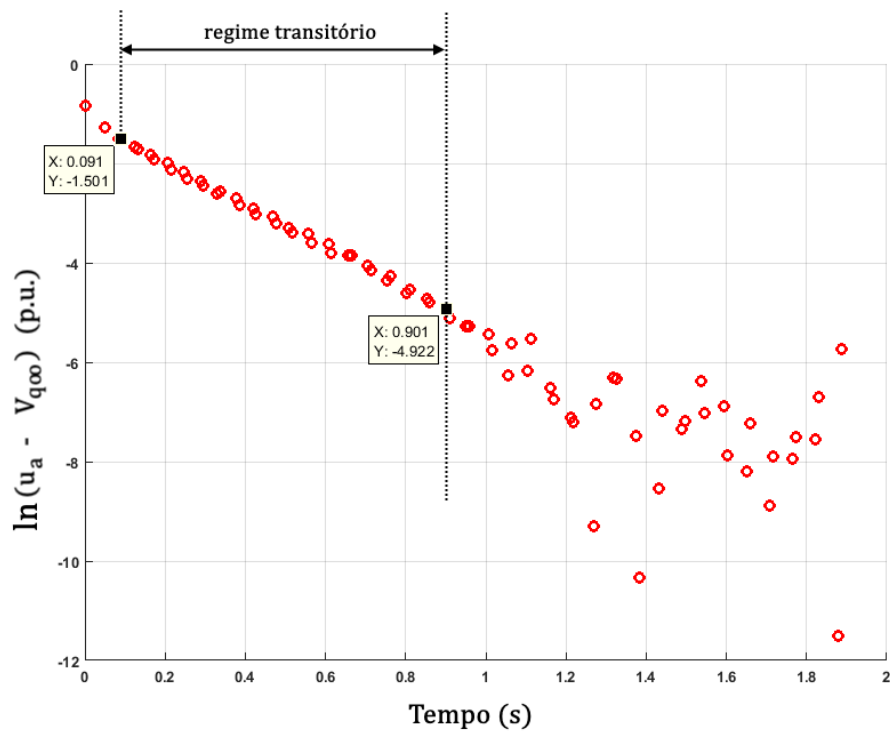


Figura 41: Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica

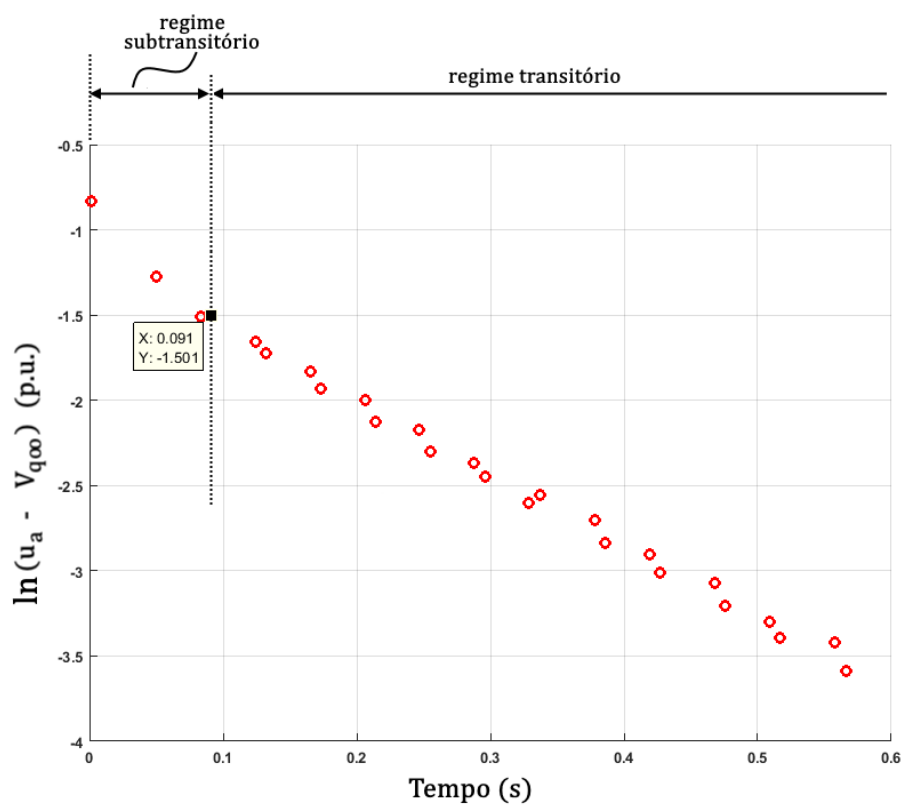


Figura 42: Envoltória da tensão de armadura medida após a rejeição de carga do eixo direto sem o regime permanente em escala semi logaritmica de 0 até 0,091s

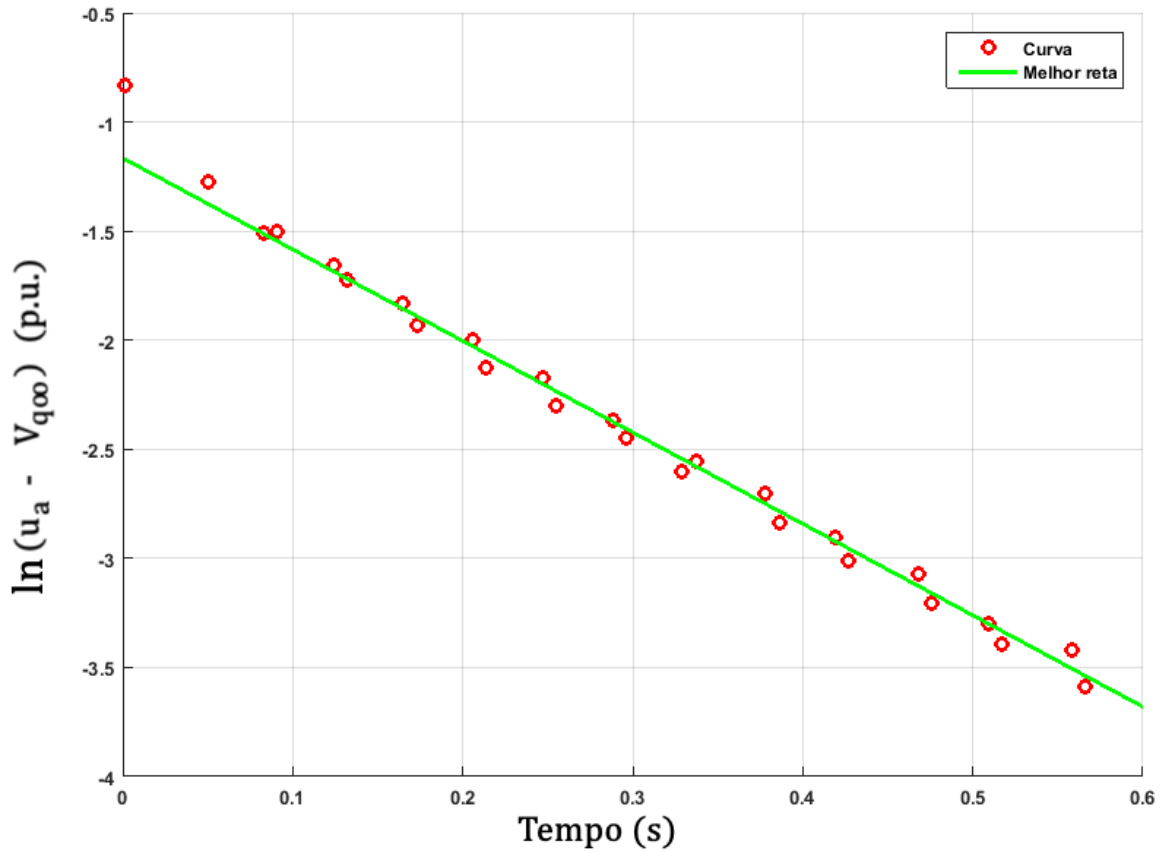


Figura 43: Melhor reta sobre o regime transitório real

Aplicando uma regressão linear na curva na região do regime transitório foi encontrada a melhor reta sobre este trecho, ilustrada na Figura 43. Os coeficiente angular m_1 e coeficiente linear h_1 encontrados para a melhor reta foram:

$$m_1 = -4,1919$$

$$h_1 = -1,1652$$

Os coefientes angular e linear da melhor reta sobre o regime transitório permitem calcular o valor de V'_{q0} e X'_d por meio da equação 4.9 e também calcular T'_{d0} por meio da equação 4.8:

$$e^{h_1} = e^{-1,1652} = V'_{q0} = 0,3119$$

$$T'_{d0} = \frac{1}{-(m_1)} = \frac{1}{-(-4,1919)} = \boxed{T'_{d0} = 0,2386s}$$

$$X'_d = X_d - \frac{V'_q}{i_{d0}} = 0,746 - \frac{0,3119}{0,583} = \boxed{X'_d = 0,2118pu}$$

5.2.1.3 Cálculo da reatância subtransitória do eixo direto X_d'' e da constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto T_{d0}''

Depois de calculados os valores de V_{q0}' e T_{d0}' , é possível subtrair a relação $(V_{q0}'' \cdot e^{-t/T_{d0}'})$ da curva da Figura 40, obtendo assim uma nova curva, mostrada na Figura 44, contendo somente o regime subtransitório.

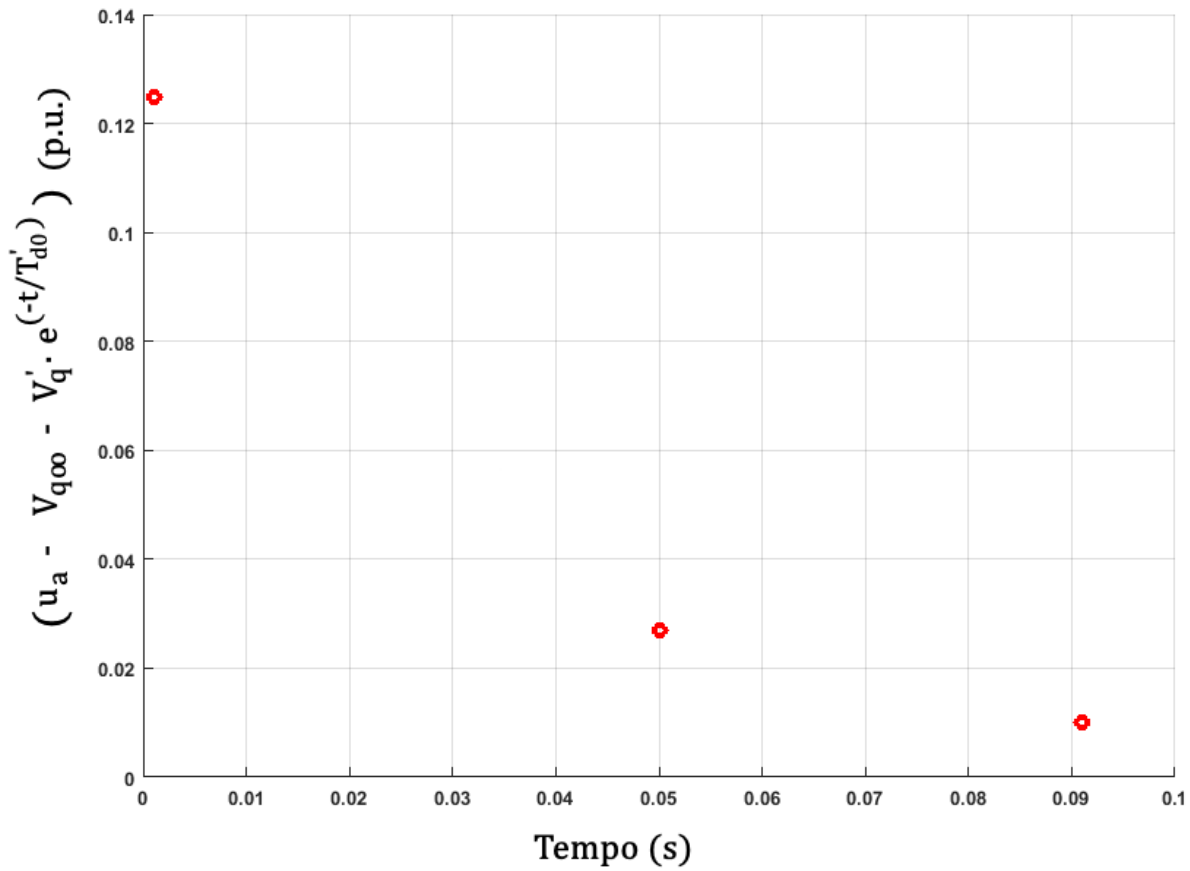


Figura 44: Curva da tensão medida no regime subtransitório da rejeição do eixo direto

Tomando-se a curva da Figura 44 em escala semi logarítmica e novamente aplicando uma regressão linear sobre a curva, foi encontrada a melhor reta ilustrada na Figura 45. O coeficiente angular m_2 e o coeficiente linear h_2 encontrados para a melhor reta foram:

$$m_2 = -28,2115$$

$$h_2 = -2,0983$$

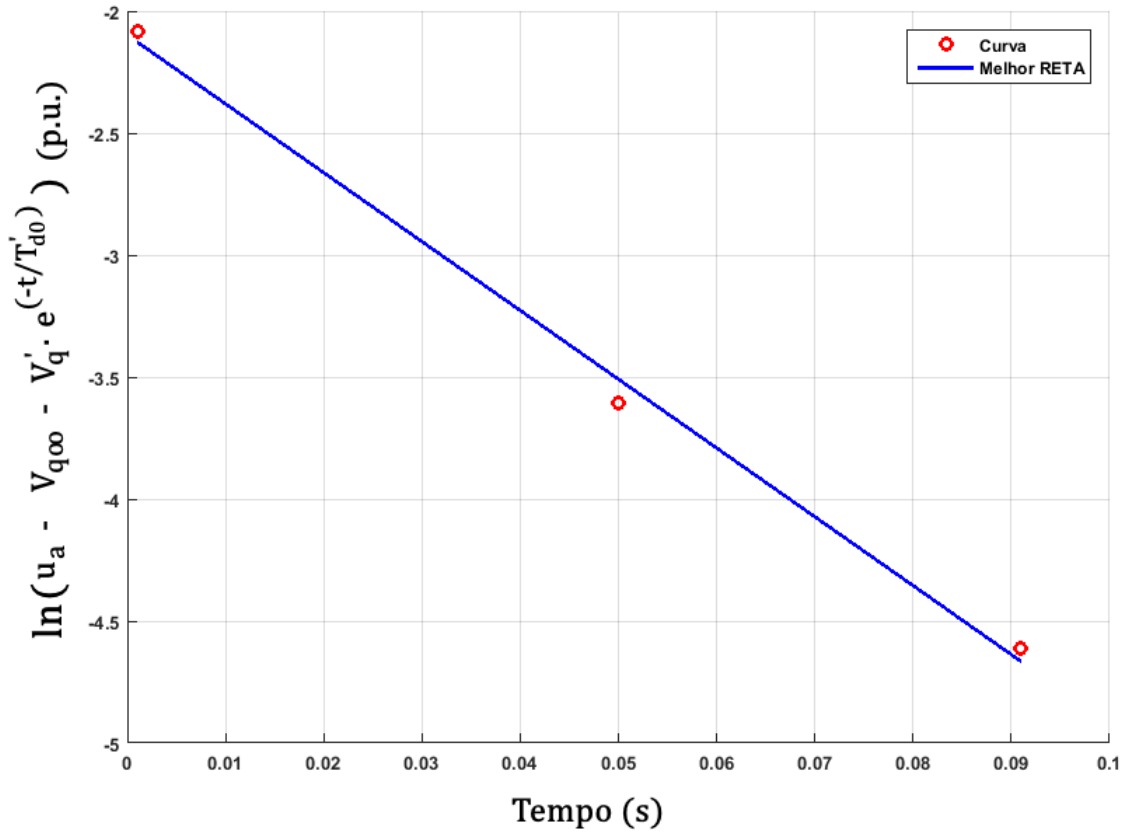


Figura 45: Melhor reta sobre o regime subtransitório real

Os coeficientes angular e linear da melhor reta sobre o regime subtransitório permitem calcular o valor de V''_{q0} e X''_d por meio da equação 4.12 e também calcular T'_{d0} por meio da equação 4.11, respectivamente.

$$e^{h_2} = e^{-2,0983} = V''_{q0} = 0,1227$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{-(m_2)} = \frac{1}{-(-28,2115)} = \boxed{T''_{d0} = 0,0354s}$$

$$X''_d = X_d - \frac{V''_q}{i_{d0}} = 0,2018 - \frac{0,1227}{0,6120} = \boxed{X''_d = 0,0013pu}$$

5.2.1.4 Aplicando o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros do eixo direto

Os parâmetros calculados analiticamente no item 5.2.1.1, no item 5.2.1.2 e no item 5.2.1.3 foram aplicados como estimativas iniciais no algoritmo do método de sensibilidade de trajetória para que pudessem ser otimizados, ou seja, convergirem para os valores mais

próximos possíveis do sistema real. O modelo matemático utilizado no algoritmo foi a equação 2.21.

Adotando uma tolerância de $1 \cdot 10^{-10}$ o algoritmo apresentou um valor constante de erro $J(p) = 4,4835 \cdot 10^{-6}$ após três iterações. Isso permite concluir que esse é o erro mínimo a ser atingido, assim os valores finais a serem estimados foram considerados como sendo os parâmetros após a terceira iteração, como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13: Evolução dos parâmetros no método de sensibilidade de trajetória aplicado nos parâmetros do eixo direto

	X_d [pu]	X'_d [pu]	T'_{d0} [s]	X''_d [pu]	T''_{d0} [s]	$J(p)$
Estimativas iniciais	0,7460	0,2118	0,3386	0,0014	0,0354	$4,7692 \cdot 10^{-4}$
depois da 1ª iteração	0,7114	0,2548	0,2635	-0,0196	0,0476	$8,5749 \cdot 10^{-6}$
depois da 2ª iteração	0,7124	0,2208	0,2436	-0,0256	0,0393	$4,5543 \cdot 10^{-6}$
depois da 3ª iteração	0,7125	0,2230	0,2457	-0,0262	0,0397	$4,4835 \cdot 10^{-6}$
depois da 4ª iteração	0,7125	0,2229	0,2457	-0,0263	0,0396	$4,4835 \cdot 10^{-6}$
depois da 5ª iteração	0,7125	0,2230	0,2457	-0,0262	0,0396	$4,4835 \cdot 10^{-6}$

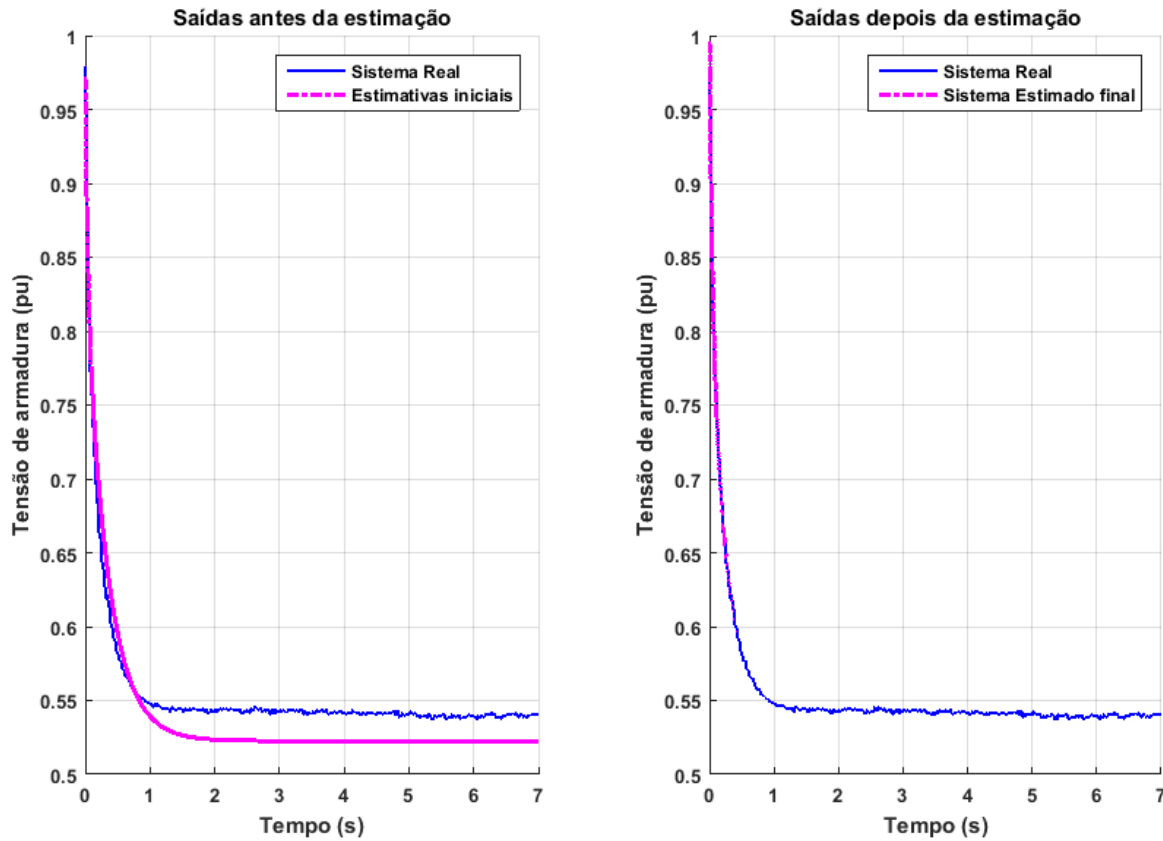


Figura 46: Evolução da envoltória da tensão de armadura antes e depois da aplicação da sensibilidade de trajetória simulado do eixo direto

Assim alcançou-se os valores de convergência dos parâmetros estimados para o eixo direto, apontados na Tabela 14. Estes parâmetros estimados são comparados aos valores dos parâmetros "reais" do gerador do laboratório. Este já teve seus parâmetros estimados anteriormente no trabalho de (BEORDO et al., 2014). A Figura 46 mostra a envoltória da resposta da tensão de armadura do eixo direto do sistema com as estimativas iniciais com os parâmetros estimados finais.

O valor atingido após a convergência para a reatância subtransitória do eixo direto corresponde à $X_d'' = -0,0262pu$, porém esse valor foi desconsiderado, visto que não existe reatância negativa. Foi adotado, então o valor da estimativa inicial de $X_d'' = 0,0014pu$.

Tabela 14: Parâmetros finais da estimação do eixo direto comparados com os parâmetros já conhecidos do gerador

Parâmetro	Valor Estimado	Valores já conhecidos (BEORDO et al., 2014)	Erro de estimação
X_d	0,7125 pu	0,89 pu	24,9%
X_d'	0,2229 pu	0,22 pu	1,3%
T_{d0}'	0,2457 s	0,2389 s	2,7%
X_d''	0,0014 pu	0,12 pu	> 100%
T_{d0}''	0,0396 s	0,0151 s	38,1%

5.2.2 Ensaio de rejeição do eixo arbitrário

No ensaio de rejeição de eixo arbitrário foi aplicada uma carga puramente capacitiva, juntamente com uma carga resistiva, amostrados os dados referentes à corrente e tensão antes de depois da rejeição como ilustrado no esquemático da Figura 47. Isso fez com que fosse obtida potência reativa, uma potência ativa e os valores de corrente e tensão imediatamente antes da rejeição, os quais seguem transcritos na Tabela 15.

Tabela 15: Valores medidos imediatamente antes da rejeição do eixo arbitrário

Grandeza	Valor
Q_0	-0,4047 pu
P_0	0,4010 pu
U_0	0,9944 pu
I_0	0,576 pu

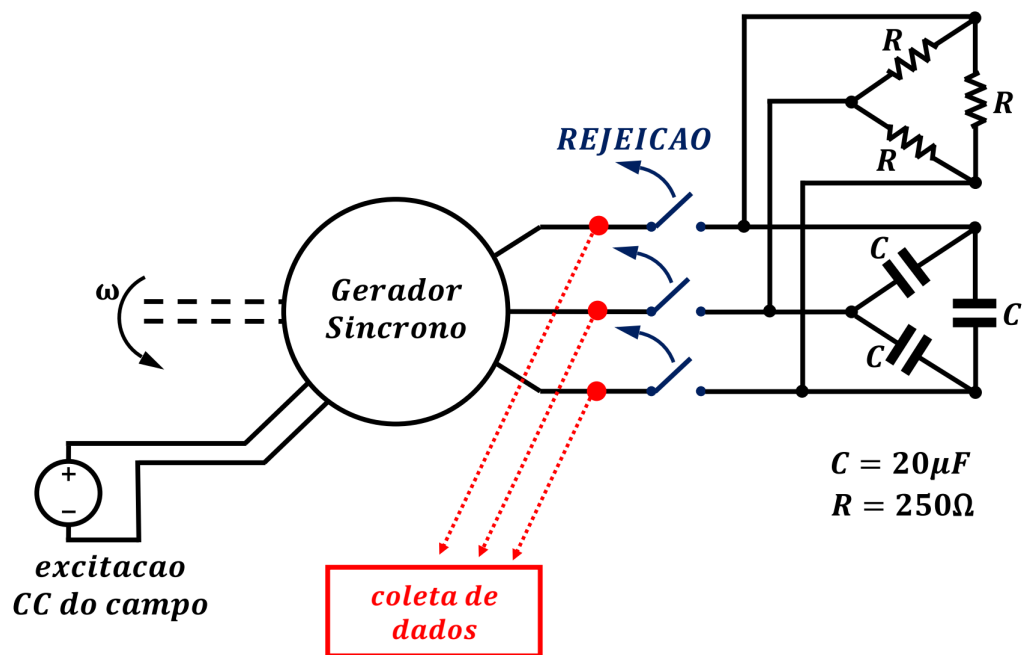


Figura 47: Esquemático de rejeição do eixo arbitrário do ensaio prático

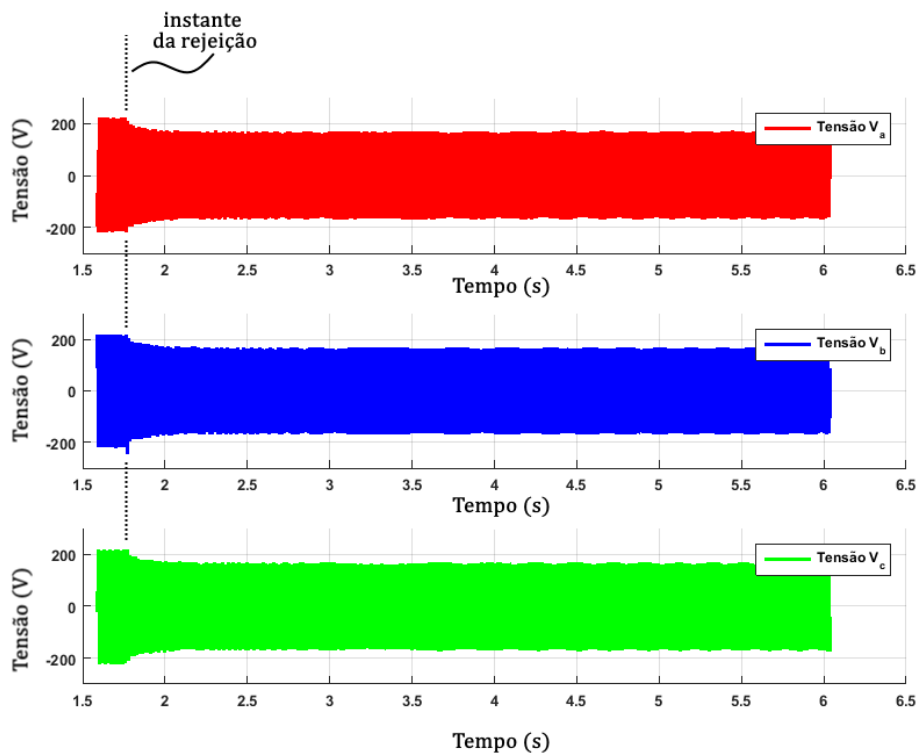


Figura 48: Tensão de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo arbitrário

O comportamento da tensão de armadura em cada fase (em V), após a rejeição segue na Figura 48 e o comportamento da corrente (em A), na Figura 49.

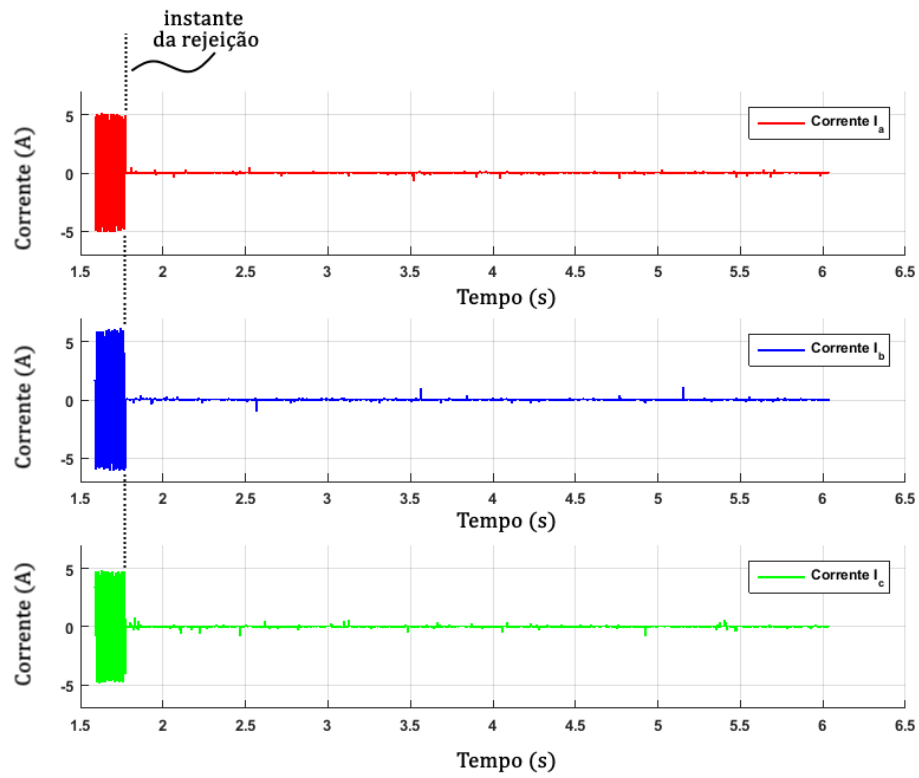


Figura 49: Corrente de armadura medida nas três fases após a rejeição de carga do eixo arbitrário

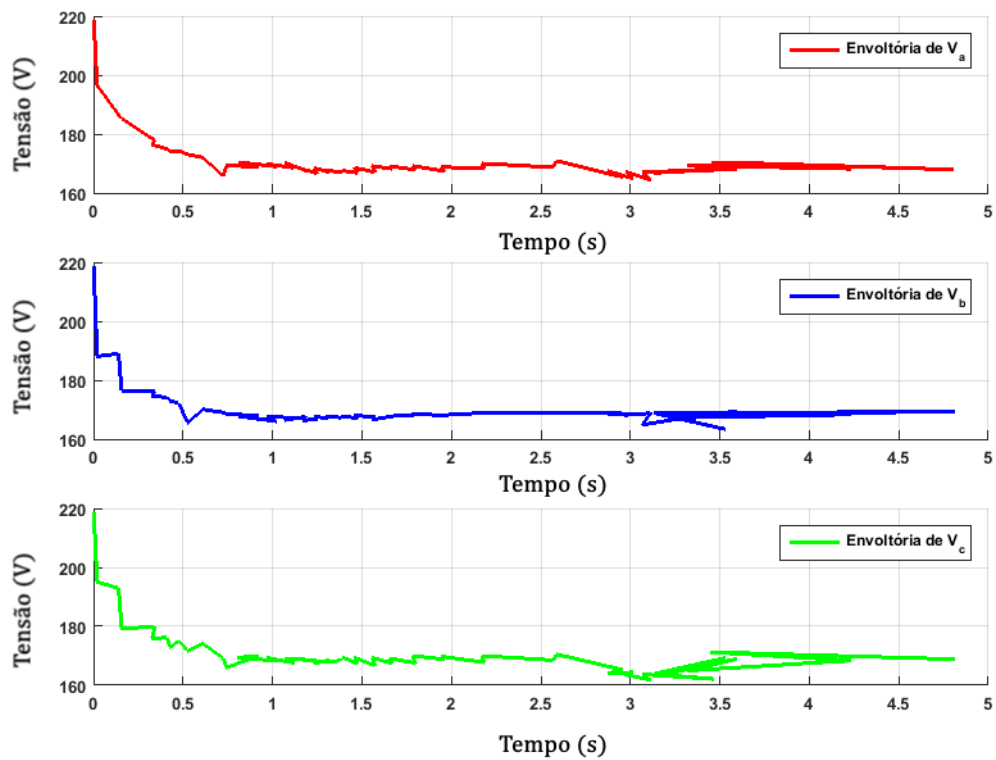


Figura 50: Envoltórias das tensões medidas em cada fase após a rejeição do eixo arbitrário

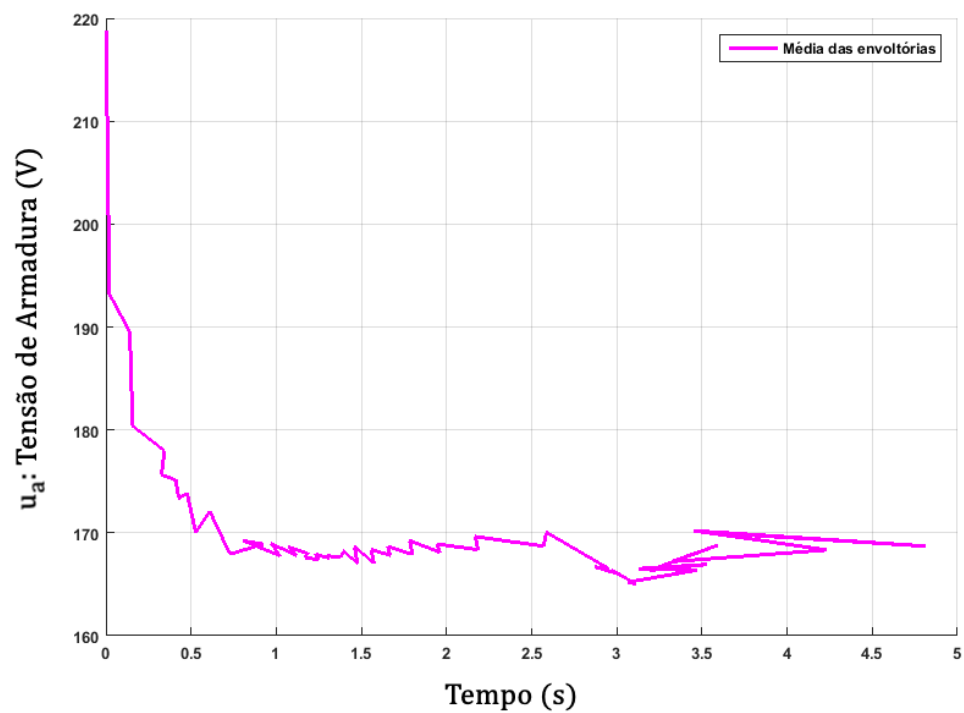


Figura 51: Média das envoltórias das tensões medidas das três fases após a rejeição do eixo arbitrário (em V)

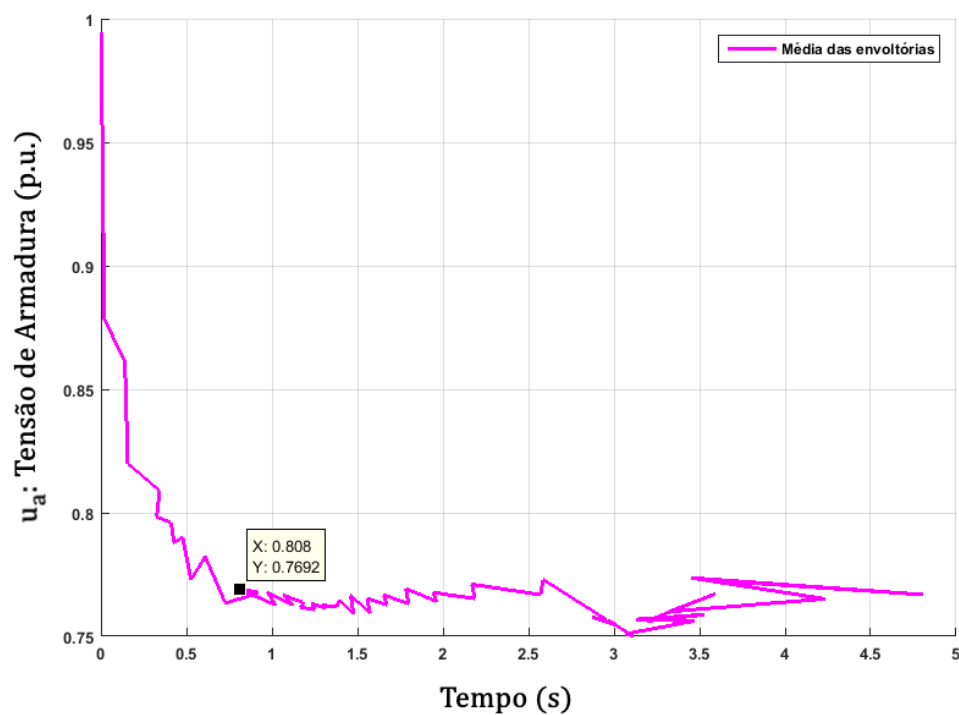


Figura 52: Média das envoltórias das três fases das tensão após a rejeição do eixo arbitrário (em pu)

Fazendo um tratamento dos dados contidos na Figura 48, foram obtidas as envoltórias superior e inferior da tensão de armadura de cada fase e logo após, concatenadas as duas envoltórias para obter uma maior quantidade de pontos. As envoltórias para cada fase seguem na Figura 50.

Em seguida foi realizada a média entre as envoltórias das três tensões a qual é mostrada na Figura 51 com seu valor em Volts.

Normalizando a envoltória da Figura 51 obteve-se a média das envoltórias em p.u. assim como traz a Figura 52.

O gerador analisado tem uma potência elétrica baixa quando comparado com a grande maioria dos geradores síncronos. Os parâmetros referentes ao eixo em quadratura e referentes ao regime subtransitário do eixo direto de geradores de alta potência são pequenos (TINDALL et al., 1996). Estes apresentam uma dificuldade de serem estimados corretamente e seus testes de estimação são mais dificilmente realizados, além de estarem susceptíveis à erros.

Os parâmetros referentes ao eixo em quadratura não foram possíveis calculados devido aos fatores citados.

6 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho foi estimar os parâmetros padronizados de um gerador síncrono utilizando o teste de rejeição de carga. As simulações realizadas mostram que é possível determinar os parâmetros de geradores síncronos utilizando uma metodologia gráfica.

Foram realizados os testes práticos em laboratório no ensaio de rejeição de carga do eixo direto e também o ensaio de rejeição do eixo arbitrário, ambos *off-line*, porém só foi possível determinar os parâmetros do eixo direto, os quais o parâmetro X_d'' apresentou um valor negativo, indicando algum erro.

Foi também utilizado o método de sensibilidade de trajetória para otimizar os parâmetros encontrados pelo método gráfico. Esta otimização mostrou uma boa eficiência do método, obtendo a convergência do algoritmo após três iterações. Quando os parâmetros estimados foram comparados com parâmetros conhecidos (BEORDO et al., 2014), apresentaram um erro de 38,1%, no máximo. Ressalta-se que os parâmetros de (BEORDO et al., 2014) também foram obtidos por métodos de otimização.

Os erros de estimação podem ser atribuídos às seguintes razões:

- Impossibilidade de monitoramento da velocidade de rotação do gerador durante os ensaios, uma vez que foram enfrentados problemas técnicos no laboratório;
- Variáveis mecânicas que não foram considerados em nenhuma etapa dos testes;
- O fato do gerador ser de baixa potência - $2KVA$ - o que implica que os valores de seus parâmetros referentes ao regime subtransitário são de uma grandeza pequena, dificultando sua identificação durante os testes convencionais.

6.1 Trabalhos Futuros

- Utilização do monitoramento da velocidade do gerador antes de depois da rejeição de carga durante os testes práticos;
- Implementação dos algoritmos utilizados no trabalho em um código de programação *open source*;
- Levantamento de um banco de dados como parâmetros típicos para geradores de baixa potência;
- Otimização do sistema de aquisição de dados para estimar parâmetros referentes ao eixo em quadratura de geradores síncronos;

REFERÊNCIAS

- BEORDO, L. et al. Determinação experimental dos parâmetros de um gerador síncrono via testes convencionais (off-line) e via técnica de análise de sensibilidade de trajetória (on-line). **Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo**, 2014.
- BORTONI, E. da C.; JARDINI, J. A. Identification of synchronous machine parameters using load rejection test data. **IEEE Transactions on energy conversion**, IEEE, v. 17, n. 2, p. 242–247, 2002.
- CARCASI, L.; BALDOMERO, D. et al. Uma contribuição ao estudo, projeto eletromagnético e determinação de parâmetros operacionais de geradores síncronos trifásicos de polos salientes usando o método dos elementos finitos. [sn], 2012.
- CARI, E. P. T. **Metodologia de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos não-lineares com aplicação em geradores síncronos**. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- DANDENO, P. et al. Ieee guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analyses. **IEEE Std. 1110–2002**, p. 1–72, 2003.
- FAJONI, F. C. et al. Estudo sobre determinação de parâmetros elétricos de geradores síncronos de polos salientes. [sn], 2010.
- GUIDE, I. Test procedures for synchronous machines part i—acceptance and performance testing part ii-test procedures and parameter determination for dynamic analysis.". **IEEE Std**, v. 115, 2010.
- MELLO, F. D.; RIBEIRO, J. Derivation of synchronous machine parameters from tests. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, v. 96, n. 4, p. 1211–1218, 1977.
- PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 48, n. 3, p. 716–727, 1929.
- TINDALL, C. et al. Transient characteristics of small salient-pole alternators. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 11, n. 3, p. 539–546, 1996.