

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MATHEUS CÂMARA DOS SANTOS BEZERRA

**Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de geradores síncronos**

São Carlos  
2016

MATHEUS CÂMARA DOS SANTOS BEZERRA

**Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de geradores síncronos**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistema de Energia e Automação, 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  
2016

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

B574m Bezerra, Matheus Câmara dos Santos  
Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de  
geradores síncronos / Matheus Câmara dos Santos  
Bezerra; orientador Elmer Pablo Tito Cari. São Carlos,  
2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2016.

1. Parâmetros mecânicos. 2. Gerador síncrono. 3.  
Constante de inércia. 4. Constante de amortecimento. I.  
Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Matheus Câmara dos Santos Bezerra

Título: "Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de geradores síncronos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 22/11/2016,

com NOTA 7,5 (sete, cinco), pela Comissão Julgadora:

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

*Mestre Carlos Matheus Rodrigues de Oliveira - Doutorando - SEL/EESC/USP*

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

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

## RESUMO

BEZERRA, M. C. S. Métodos de estimação dos parâmetros mecânicos de geradores síncronos. 2016 P41. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Neste trabalho é implementado técnicas para estimação dos parâmetros mecânicos do gerador síncrono, constante de inércia e constante de amortecimento. Foram realizadas duas abordagens para este objetivo. Inicialmente os parâmetros mecânicos são estimados por métodos *off-line*, “*retardation test*”, “*Run-down test*”. Posteriormente estes parâmetros são estimados usando o método on-line chamado “sensibilidade de trajetória”. Os métodos foram implementados experimentalmente no laboratório de máquinas elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). As dificuldades para a realização dos testes foram discutidas ao longo do texto. Os resultados mostraram a correta estimação dos parâmetros a tanto dos métodos *off-line* como no *on-line*.

Palavras-chave: Parâmetros mecânicos. Gerador síncrono. Constante de inércia. Constante de amortecimento.

## ABSTRACT

CÂMARA DOS SANTOS BEZERRA. Methods of estimation of the mechanical parameters of synchronous generators. 2016 P41. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

This work implements techniques for the estimation of the mechanical parameters of synchronous generator, inertia constant and damping constant. Two approaches were performed for this purpose. Initially, the mechanical parameters are estimated by offline methods, retardation test, run-down test. Subsequently they are estimated using the online method called "trajectory sensitivity". The methods were implemented experimentally in the laboratory of electrical machines of the Department of Electrical and Computer Engineering of the School of Engineering of São Carlos of the University of São Paulo (EESC-USP). The difficulties of the tests were discussed throughout the text. The results were satisfactory for the two methods of-line and online.

Keywords: Mechanical parameters. Synchronous generator. Constant of inertia. Damping constant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Referencia girante .....	4
Figura 2-MCC e gerador síncrono. ....	7
Figura 3 - Decaimento da velocidade.....	8
Figura 4 - Ilustração do metodo de vibração .....	10
Figura 5 -Esquema do método de queda livre .....	11
Figura 6 - "Retardio test" com carga mecânica conhecida (inercia conhecida $Jd$ ).....	12
Figura 7 - Retardion test.....	13
Figura 8 - "retardation test" com carga resistiva .....	14
Figura 9 - Fluxo grama do método de sensibilidade de trajetória .....	15
Figura 10- Fluxograma referente ao programa Generator Parameter Estimation v1.0 .....	19
Figura 11 - esquema de ligação.....	21
Figura 12 - Transformador de Potência e de Corrente .....	22
Figura 13 - Conjunto de Sincronização.....	23
Figura 14- Representação do ajuste do TC.....	24
Figura 15 - Forma de onda da tensão .....	26
Figura 16 - Analise de Fourier da tensão.....	26
Figura 17 - Forma de onda da corrente .....	27
Figura 18 - Análise de Fourier da corrente.....	28
Figura 19- Forma de onda da velocidade.....	29
Figura 20 - Analise de Fourier da velocidade .....	29
Figura 21 - Sistema Gerador Síncrono (direita) e MCC (esquerda).....	30
Figura 22 - Característica do decaimento da velocidade no "run-down test", com filtro e sem filtro .	32
Figura 23 - Decaimento da velocidade em "retardation test" sem carga.....	33
Figura 24 - Decaimento da velocidade em "retardation test" com carga.....	34
Figura 25 - Tensões no acontecimento da perturbação .....	35
Figura 26 - Corrente da perturbação.....	36
Figura 27 - Fasor de tensão e Corrente na sequencia positiva .....	36
Figura 28 - Fasor de tensão e Corrente na sequencia negativa.....	37
Figura 29 - Fasor de tensão e Corrente na sequencia zero .....	37
Figura 30 - Potência ativa de uma fase na sequencia positiva.....	37
Figura 31 - Resposta (velocidade) das simulações e do sistema real.....	38
Figura 32 - Comparação dos resultados com simulação.....	39

## LISTA DE SIGLAS

D	–	Constante de amortecimento
H	–	Constante de inércia
M	–	Constante de inércia
E	–	Força eletromotriz
J	–	Momento de inércia
$K_i$	–	Relação de corrente
$K_t$	–	Relação de potência
$S_b$	–	Potência base
$T_e$	–	Torque elétrico
$T_m$	–	Torque mecânico
TC	–	Transformador de corrente
TP	–	Transformador de potencial
$\omega$	–	Velocidade angular



## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivos .....	1
1.2	Organização da monografia .....	2
2	Modelagem mecânica da máquina síncrona .....	3
3	Métodos para estimar parâmetros mecânicos da máquina síncrona .....	6
3.1	Métodos off-line.....	6
3.1.1	Método de desaceleração ou “Run-down test” .....	6
3.1.2	Método usando as medidas mecânicas do rotor .....	9
3.1.3	Método de vibração torcional.....	9
3.1.4	Método da queda livre com polia .....	10
3.1.5	Método de aceleração retardada ou “Retardation test” [8] .....	11
3.2	Método on-line .....	14
3.2.1	Função de sensibilidade de trajetória .....	15
3.2.2	Função de sensibilidade de trajetória para sistemas dinâmicos não linear .....	16
3.2.3	Processo de minimização do erro .....	17
3.2.4	Software para estimar os parâmetros mecânicos .....	18
4	Ensaio em laboratório e resultados.....	20
4.1	Implementação do laboratório e análise de medidas.....	20
4.1.1	Montagem dos equipamentos nas placas.....	22
4.1.2	Calibragem do transformador de corrente .....	23
4.1.3	Calibragem de transformador de potencial .....	24
4.1.4	Software usado para a aquisição de dados.....	24
4.1.5	Filtragem de ruído de tensão e corrente .....	25
4.2	Resultados dos métodos off-line.....	30
4.2.1	Resultado dos teste de desaceleração “Run-down test” .....	31
4.2.2	Resultado teste de desaceleração retardada ou “Retardation test” .....	32
4.3	Teste de Sensibilidade de Trajetória .....	34
4.4	Comparação .....	38
5	CONCLUSÃO .....	40
6	REFERÊNCIAS .....	41

# 1 INTRODUÇÃO

A determinação dos parâmetros mecânicos é fundamental para a modelagem da máquina síncrona (constante de inércia e constante de amortecimento). Modelos matemáticos em função desses parâmetros são utilizados nos estudos para estudo de simulação nos campos de proteção, estabilidade elétrica do sistema de potência, operação de geradores, dentre outros. Para obter resultados satisfatórios nestas simulações, é necessário o conhecimento preciso dos parâmetros mecânicos dos geradores síncronos.

Neste trabalho, duas abordagens são comparadas para estimar os parâmetros do gerador síncrono: métodos *on-line* e *off-line*.

Os métodos *off-line* determinam os parâmetros com o gerador desligado da rede e os métodos *on-line* sem a desconexão da máquina do sistema elétrico.

Alguns testes para o método foram padronizados pelo IEEE, conforme abordado em [1] e [2]. Outras referências podem ser encontradas em [3], [4], [5]. Os testes *off-line* são: “*run-down test*”, “*retardation test*”, teste de vibração torcional e teste de queda livre com polia.

Os ensaios *off-line* são mais conhecidos na literatura, porém apresentam as seguintes desvantagens:

- Perda de geração de energia ou de trabalho, isto é, não há energia elétrica gerada enquanto acontece os testes.;
- Esforços elevado das máquinas, como o “*Run-down test*” que exige a máquina opere em uma velocidade acima da nominal.

Os métodos *on-line* tentam contornar os problemas mencionados anteriormente obtendo os parâmetros do gerador durante a operação da máquina. Poucos trabalhos foram propostos na literatura. Alguns que podem citar-se pode ser encontrado em [8][9]. Neste trabalho foi escolhido o método *on-line* baseado em sensibilidade de trajetória[6]. Por ser mais fácil de ser realizado na prática.

Este trabalho contribuir para a disciplina de laboratório de máquinas elétricas (SEL-0423) do departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo), onde os estudantes têm tido dificuldade para estimar parâmetros mecânicos no projeto proposto nesta disciplina.

## 1.1 Objetivos

Estimar os parâmetros mecânicos (constante de inércia e constante de amortecimento) do gerador síncrono usando métodos *on-line* e *off-line*. Para cumprir esse objetivo foi necessário realizar algumas etapas:

- Montar banca no laboratório para realização dos ensaios
- Fazer ensaios *on-line* e *off-line*
- Comparar dos resultados obtidos

## 1.2 Organização da monografia

O capítulo 2 apresenta alguns conceitos teóricos sobre a modelagem do gerador síncrono com a finalidade de estimação de parâmetros mecânicos do mesmo.

O capítulo 3 apresenta a descrição dos métodos *off-line* convencionais e o método *online* baseado na sensibilidade de trajetória.

O capítulo 4 apresenta os ensaios realizado em laboratório, bem como os resultados obtidos com todos os testes e a comparação entre eles.

O capítulo 5 apresenta a conclusão e algumas considerações finais do trabalho.

## 2 Modelagem mecânica da máquina síncrona

Toda máquina que faz movimento rotacional respeita as leis fundamentais da dinâmica, sabe-se que o momento de inércia “J” multiplicado pela aceleração angular é igual ao torque resultante aplicado ao rotor da máquina [6], isto é:

$$T_r = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1)$$

- $T_r$  – Torque resultante [N m]
- $J$  – Momento de inércia [kg m<sup>2</sup>]
- $\frac{d^2\theta}{dt^2}$  – Aceleração angular [rad/s<sup>2</sup>]
- $\theta$  – Deslocamento angular em relação a uma referência fixa [rad]

O torque resultante  $T_r$  é a diferença entre o torque mecânico e o torque elétrico. O torque mecânico  $T_m$ , tem origem da força que gira o eixo (no caso de termoelétrica, vapor, no caso do laboratório de máquinas elétricas usa-se o motor de corrente contínua, MCC), o torque elétrico  $T_e$ , é proporcional à potência da carga que está conectada ao gerador. Além do próprio momento de inércia com resistência da aceleração existe outro resistente a velocidade, ou seja, proporcional a tal, chamada constante de amortecimento.

Então escrevendo em termos dos torques conhecidos temos: [3]

$$T_m - T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D\omega_m \quad (2)$$

- $D$  – Constante de amortecimento [Nms]
- $\omega_m$  – Velocidade mecânica do rotor [rad/s]

Em sistemas elétricos de potência é muito mais difícil medir os torques do que a potência. A potência é obtida com correntes e tensões dos terminais da máquina. Para transformar o torque da equação (2) para potência multiplica toda equação pela velocidade síncrona, isto é:

$$P_m - P_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \omega_m + D \omega_m^2 \quad (3)$$

Em regime permanente, a velocidade da máquina possui um valor próximo da velocidade síncrona (60Hz no Brasil), portanto  $\theta$  será uma função do tempo em condições de regime permanente. Para eliminar este inconveniente, toma-se como referência angular um eixo girando à velocidade síncrona “ $\omega_s$ ”. Assim uma mudança de variável de  $\theta_m$  para  $\delta_m$ , é sugerida na figura 1 [7].

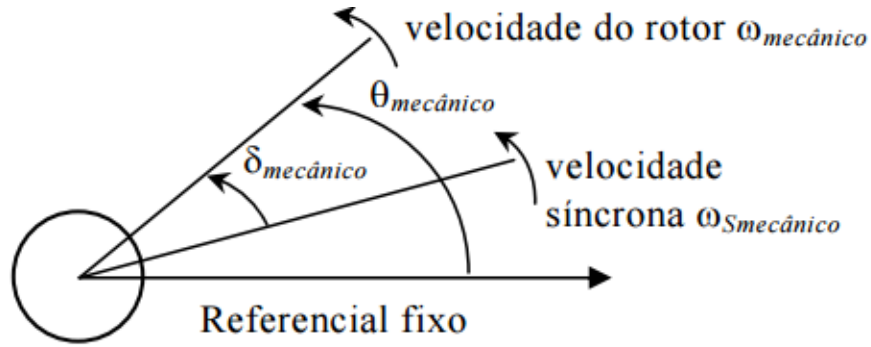


Figura 1 - Referencia girante e referencia fixa

Mudando o eixo fixo para girante à velocidade síncrona  $\omega_s$ , tem-se:

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m \quad (4)$$

Derivando a equação acima, tem-se:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (5)$$

Na equação (5),  $\frac{d\delta_m}{dt}$  é o desvio da velocidade do rotor em relação à velocidade síncrona.

Pra encontrar a aceleração, deriva-se a equação (5) novamente em relação ao tempo, ficando:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (6)$$

Considera-se  $\omega_s = \omega_m$ , já que ocorreria perda de sincronismo caso as velocidades não fossem iguais e o gerador fosse conectado ao sistema elétrico. Define-se a constante M, como

$M = J\omega_m$  chamada de constante de inércia. Usando equação (3), substituindo M por J e  $\theta_m$  por  $\delta_m$ , tem-se:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D\omega_m = P_m - P_e \quad (7)$$

Nos dados do gerador em estudo de estabilidade outra constante com relação a inércia é usada. Também chamada de constante de inercia H. A equação (8) representa a definição de H. [7]

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_s^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_s}{S_b} [J/VA] \quad (8)$$

Onde  $S_b$  é a potência base trifásica do gerador em volt-ampere

Isolando o M da equação (8),

$$M = \frac{2H}{\omega_s} S_b \quad (9)$$

Com a substituição de M na equação (7),

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + \frac{D\omega_m}{S_b} = \frac{P_m - P_e}{S_b} \quad (10)$$

Isolando a aceleração. As potências em pu.:

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{2H} [P_m - P_e - \frac{D}{\omega_0} \omega] \quad (11)$$

- $\omega_0 = 2 \pi f$  - Velocidade síncrona da rede.
- $f$  – Frequência elétrica do sistema
- $\omega$  – velocidade da máquina síncrona
- Parâmetros do gerados p= [ H, D].

A parti do H se encontra o J de (8),  $J = 2HS_b/\omega_s^2$ .

$$J \frac{d\omega}{dt} + d\omega = T_m - T_e \quad (12)$$

### 3 Métodos para estimar parâmetros mecânicos da máquina síncrona

Neste trabalho determina-se os parâmetros mecânicos do gerador síncrono H e D. A partir de H pode-se determinar J usando a equação (12). Entretanto destaca-se que dos dois parâmetros a maior ênfase é a determinação do momento de inércia J, pois é o parâmetro mecânico mais importante na modelagem de geradores síncronos (em alguns trabalhos que não necessita de uma precisão o parâmetro D é desprezado por ser um valor muito pequeno).

Na sequência são apresentados os métodos mais comuns off-line e on-line. Entretanto apenas alguns deles serão utilizados na parte experimental devido a facilidade de realizar no laboratório.

#### 3.1 Métodos off-line

No laboratório, assim como no campo de trabalho, o gerador está ligado a um eixo que transforma energia mecânica em elétrica. Dificilmente é possível separar o eixo da turbina com o do gerador e calcular os parâmetros mecânicos separadamente. No laboratório utiliza-se um motor de corrente contínua (MCC), que é ligado ao eixo do gerador síncrono (GS), simulando a turbina de qualquer usina. Então pode-se usar a dinâmica do MCC e GS para determinar os parâmetros mecânicos do conjunto.

##### 3.1.1 Método de desaceleração ou “Run-down test”

A figura 2 mostra a configuração para realizar o ensaio.

Inicialmente a máquina síncrona vai ser colocada em vazio, o motor CC nessa situação está operando com uma corrente  $I_a$  e tensão  $V_t$ , a corrente  $I_f$  é fixada no valor de operação do motor, na posição um. Na posição dois, o disjuntor da máquina CC vai ser aberta e será obtida a velocidade[3].

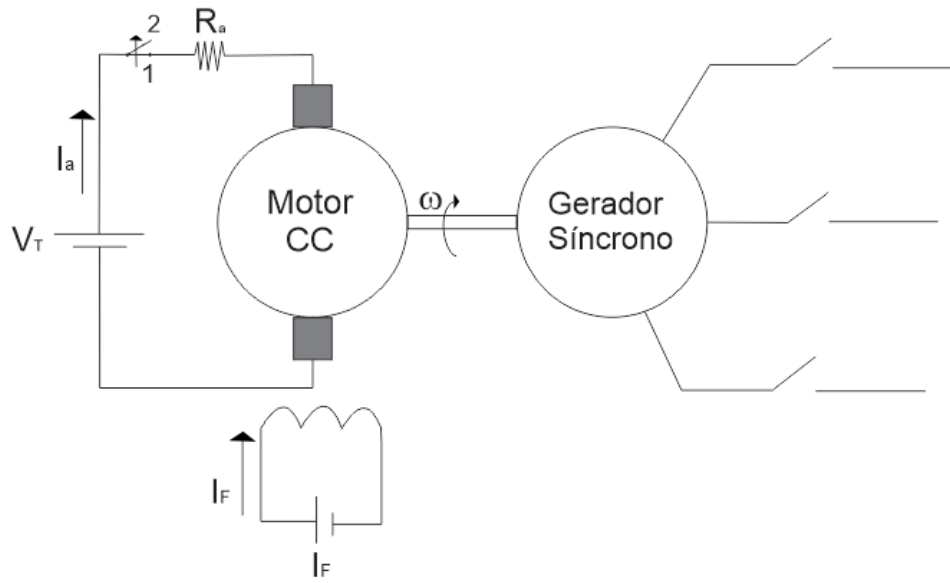
O teste pode ser resumido com:

- 1) estabelecer a tensão de campo do MCC e fixa-la no valor de operação,

2) elevar a tensão de armadura da MCC, até uma velocidade 20% da velocidade nominal (espera-se que a velocidade nominal das duas máquinas sejam iguais),

3) desligamento instantâneo do motor (recomenda-se uma, chave, contator ou disjuntor) e obtêm a função de decaimento de velocidade.

O esquema de ligação encontra-se na figura 2.



*Figura 2-MCC e gerador síncrono.*

Após a abertura a dinâmica do decaimento da velocidade pode ser representado pela equação (12) com  $T_m=T_e=0$ , ficando:

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega = 0 \quad (13)$$

Essa equação diferencial ordinária pode-se ser resolvida considerando o momento de inércia e constante de amortecimento constantes. A função da velocidade observada e calculada pode ser escrita:

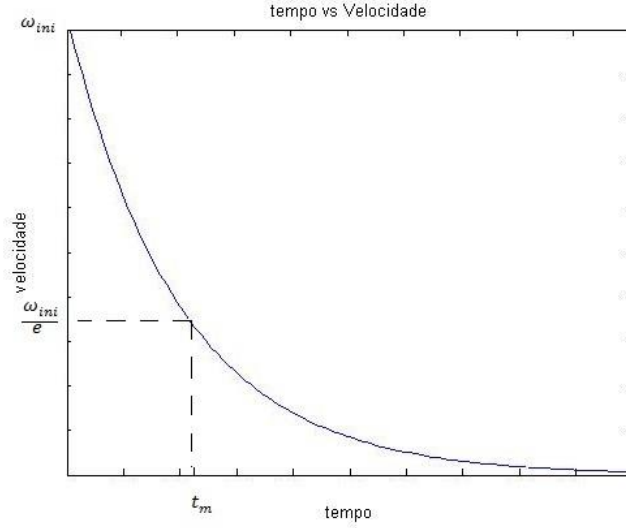
$$\omega = \omega_{ini} e^{-\frac{D}{J}t} \quad (14)$$

Onde,  $\omega_{ini}$  é velocidade inicial do teste.



Na segunda parte do teste, que consiste no desligamento do motor, quando a velocidade reduz para  $e^{-1}$  (ou 0,368) da velocidade de início, o tempo é  $t_m$  como ilustrado na figura 3.

$$\ln(e^{-1}\omega_{ini}) = \ln\left(\omega_{ini}e^{-t_m\frac{D}{J}}\right) \quad (17)$$



*Figura 3 - Decaimento da velocidade*

Simplificando a equação,

$$t_m \frac{D}{J} = 1 \quad (18)$$

Isolando o J,

$$J = t_m D \quad (19)$$

Dispõe-se de uma equação e duas incógnitas D e J.

Para se obter a constante D basta usar a equação (12), com o motor de corrente contínua na velocidade em regime permanente  $\frac{d^2\theta}{dt^2} = 0$ , o torque resultante é o torque em vazio ( $T_{vazio}$ ), os equacionamentos do MCC são representados pelas equações (20 e 21) e D é obtido com as seguintes equações:

$$D = \frac{T_{vazio}}{\omega} \quad (20)$$

O torque em vazio pode ser aproximado pelo torque do MCC descrito:

$$T_{vazio} = \frac{V_a I_a - I_a^2 R_a}{\omega} \quad (21)$$

Sendo:

$I_a$  corrente de armadura do motor CC;

$V_a$  tensão de armadura do motor CC;

$R_a$  resistência de armadura do motor CC.

Para a determinação de D é preciso de  $R_a$  (resistência de armadura da MCC), algumas medidas de tensão do estator em regime permanente e medidas da corrente de armadura.

Com o tempo de decaimento e a constante de amortecimento se calcula a constante de inercia por equação (19).

### 3.1.2 Método usando as medidas mecânicas do rotor

É possível estimar o momento de inércia só com as dimensões do rotor [8]. Pode-se dividir o rotor em partes geométrica e calcular cada parte individualmente. Por exemplo, dividir o rotor em eixo e parte elétrica, seriam um cilindro maciço e um cilindro maciço com uma cavidade central. Então o cálculo será

$$J = m_s r_s^2 + \frac{1}{2} m_c (r_{oc}^2 + r_s^2) \quad (22)$$

$m_s$  - Massa do eixo,  $r_s$  - raio do eixo

$m_c$  - Massa do enrolamento de campo,  $r_s$  e  $r_{oc}$  raio interno e externo do enrolamento de campo.

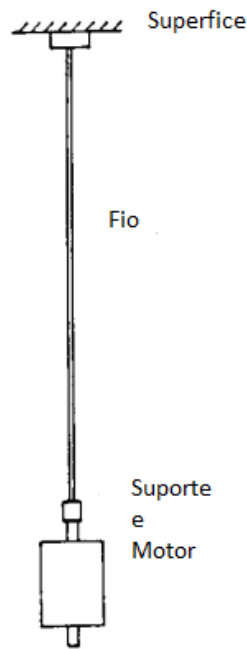
Essa medida é a menos precisa, mas pode servir como estimativa inicial, estimativa do valor, ou quando não há outro modo de determinar o parâmetro. Outra desvantagem é que é necessário retirar o rotor do eixo para a medição dos comprimento e peso.

### 3.1.3 Método de vibração torcional

Um fio vertical é pendurado fixamente na parte inferior de uma superfície preso o suficiente a ponto de segurar o motor [4]. Um objeto é usado para a calibração do experimento e necessita de um suporte para segurar o motor. Os dois objetos precisam se conhecido o momento de inercia,  $J_0$  objeto de calibração,  $J_c$  suporte. O sistema é posto em torção sobre o eixo

do suporte e do objeto de calibração e a frequência natural é medida, como ilustra a figura 4. Então o período  $T_0$  é calculado. A segunda etapa é retirar o objeto e pôr o rotor concentricamente. O sistema é posto em torção e depois se determina-se o período,  $T$ . Com a equação a seguir calcula-se o  $J$ .

$$J = (J_0 + J_c) \left( \frac{T}{T_0} \right)^2 - J_c \quad (23)$$



*Figura 4 - Ilustração do método de vibração*

A desvantagens do teste, é suspender o motor por um fio e a necessidade de conhecer o  $J$  de outro objeto.

#### 3.1.4 Método da queda livre com polia

Nesse teste precisa-se de uma polia, um peso, dois detectores de posição, e um cabo de sustentação do peso[4], como é mostrado na figura 5.

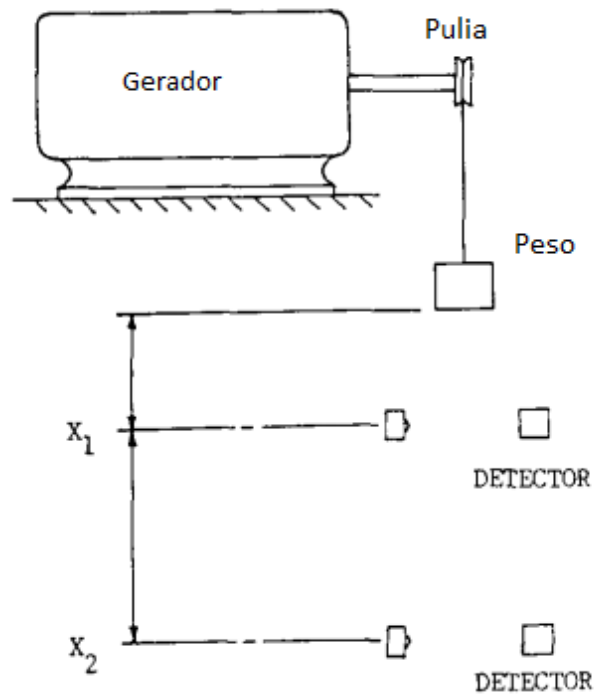


Figura 5 -Esquema do método de queda livre

A máquina deve estar desligada neste teste. Esse experimento serve para calcular o momento de qualquer objeto, basta garantir que o eixo de rotação fique concêntrico.

A aceleração da queda livre pode ser calculada pela seguinte equação 22:

$$a = \frac{2(X_1 + X_2) - 4(X_1 X_2)^{0.5}}{t_2 - t_1} \quad (24)$$

Onde,  $t_2 - t_1$  é o intervalo de tempo que o peso passa por  $X_1$  para  $X_2$ .

O peso precisa ser grande o suficiente para vencer os atritos, e inércia inicial. Com todos parâmetros conhecidos, momento de inércia da roldana, diferença de tempo, massa do peso  $M$ , raio da polia  $r$ , e aceleração gravitacional  $g$ , é só usar a equação a seguir

$$J = [(1/a) - (1/g)]Mr^2 - J_p \quad (25)$$

### 3.1.5 Método de aceleração retardada ou “Retardation test” [8]

Este teste se parece muito com o método “run-down test”, mas precisa de duas desacelerações. O teste se baseia na equação (13), onde é possível calcular as duas variáveis interes-

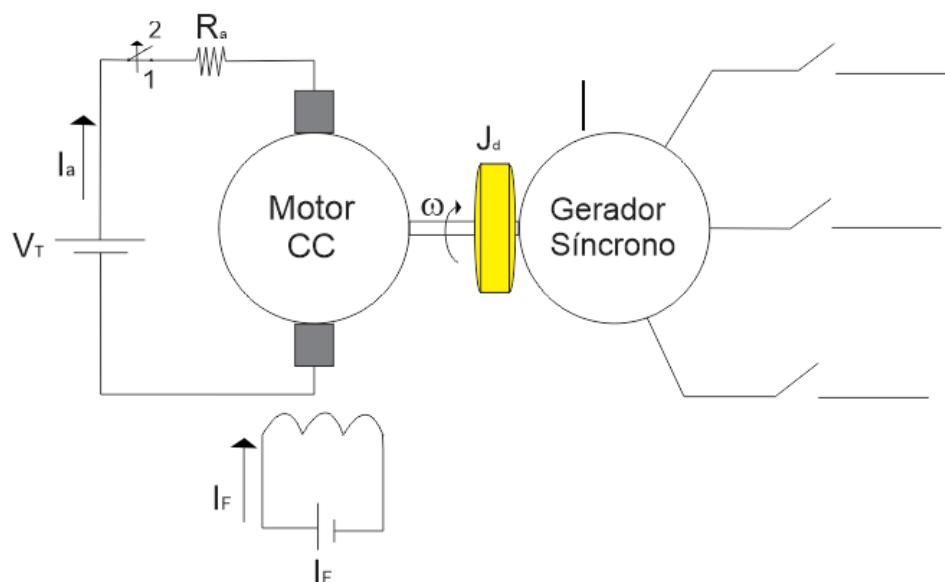
sadas,  $J$  e  $D$ . Esse teste precisa do monitoramento da velocidade angular e uma carga com momento conhecido, que pode ser um objeto acoplado no eixo (carga mecânica) ou pode usar uma carga resistiva, portanto tem-se duas versões.

**A) Método de “Retardation test” com carga mecânica:** (consiste em dois testes)

Teste 1): Primeiramente é ligado o MCC acoplado ao gerador síncrono da mesma forma feita do ensaio 3.1.1) “run down test” e se obtém a velocidade,  $\omega = \omega_{ini} e^{-\frac{D}{J}t}$  entrando esta equação tem duas incógnitas. Assim é necessário um segundo ensaio para encontrar a outra incógnita:

Teste 2): No segundo ensaio é acoplado a carga mecânica com  $J_d$  conhecido (figura 6). Faz-se o mesmo procedimento do primeiro ensaio, liga a mesma velocidade do ensaio 1, desliga quando em regime. A equações serão as mesmas, mas com valores diferentes.

$$(J + J_d) \frac{d\omega_2}{dt} + D\omega_2 = 0 \quad (26)$$



*Figura 6 - "Retardation test" com carga mecânica conhecida (inércia conhecida  $J_d$ )*

Um exemplo é se a carga mecânica for um disco de momento de inércia  $J_d$ , pode ser calculado  $J_d = \frac{1}{2}mr^2$ , caso seja um cilindro sólido de um único material.

Com duas equações (13), (26) e duas incógnitas, faz-se o sistema de equações e descobrem-se os parâmetros J e D. Com o decaimento das duas velocidades ( $\omega_1$  e  $\omega_2$ ), se escolhe um ponto de cada curva que tenha a mesma velocidade ( $\omega_1 = \omega_2$ ). Pode ser qualquer ponto da curva, mas recomenda-se pegar uma velocidade não muito baixa. A aceleração  $\frac{d\omega}{dt}$  é obtida pela diferença,  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega(t_{1+i}) - \omega(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$ .

Na figura 7 é ilustrado o decaimento das duas velocidades e a aceleração em um certo ponto que é a inclinação das retas.

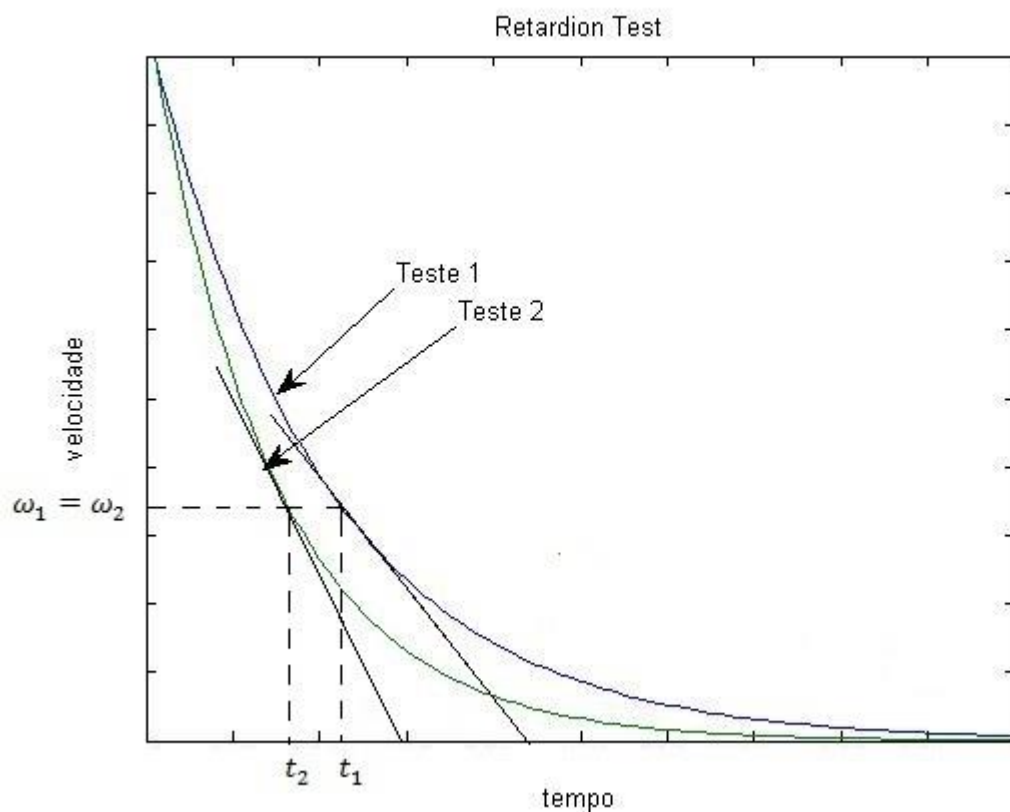


Figura 7 – “Retardation test”

**B): Método de “Retardation test” com carga resistiva:** (consiste em dois testes)

Usa-se uma carga elétrica e uma resistência que é ligada no terminal da máquina de corrente contínua e procede desligando-a como mostra a figura 8.

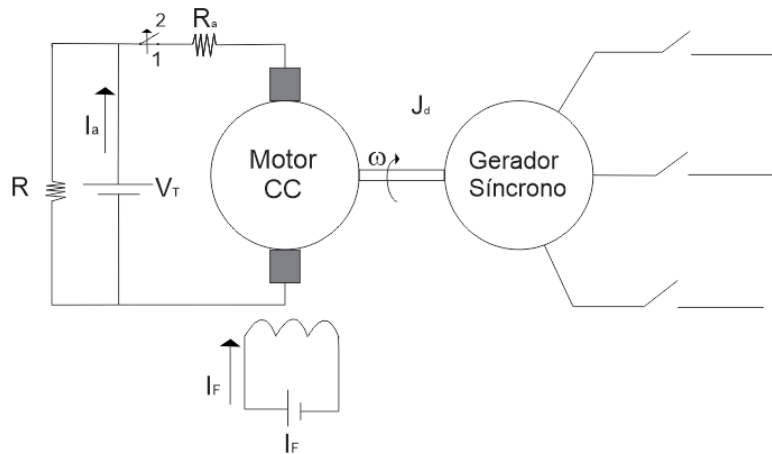


Figura 8 - "retardation test" com carga resistiva

Nessa situação usa a equação da energia, que é a mesma equação (13), mas multiplicando pela velocidade atual. No primeiro ensaio só tem energia rotacional e no segundo adiciona a energia que a carga resistiva vai consumir, então fica:

$$J\omega_2 \frac{d\omega_2}{dt} = E^2/R + J\omega_1 \frac{d\omega_1}{dt} \quad (27)$$

Os termos D são cancelados, pois as velocidades são iguais,  $\omega_1 = \omega_2$ . As acelerações serão diferentes  $\frac{d\omega_1}{dt}$  e  $\frac{d\omega_2}{dt}$ , R resistência da carga e E tensão induzida no motor CC, ilustrado na figura 8. Isolando o J tem-se:

$$J = E^2 / [R(\frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt})\omega_1] \quad (28)$$

Vale ressaltar que a velocidade e a posição têm que estar sem ruído para um fácil cálculo da derivada, ou um modo fácil de contornar esse problema é aproximar para uma função matemática, a velocidade ou a posição.

### 3.2 Método on-line

Para este trabalho foi escolhido o método de sensibilidade de trajetória proposto em [6]. Não existe métodos on-line realizados na literatura.

O método de sensibilidade de trajetória possibilita a estimação de parâmetros de equações lineares e não-lineares[6], conhecendo as saídas, entradas e as funções diferenciais em relação a cada parâmetro. A técnica minimiza a diferença entre entrada e saída, ajustando os parâmetros até que o erro seja minimizado e menor do que um valor pré-determinado.

Com o diagrama da figura 9 fica fácil a visualização do processo do método de sensibilidade de trajetória.



*Figura 9 - Fluxograma do método de sensibilidade de trajetória*

A entrada (u) nesse caso são as tensões e correntes no terminal da máquina, sistema real é a máquina que a saída será a velocidade, que é comparado as tensões e correntes no modelo matemático e com o erro e matriz de sensibilidade define-se novos parâmetros.

Para um menor erro, mais fácil convergência, o sistema real tem que ser o mais próximo do ideal (sem perturbações na velocidade, tensões e correntes), já que existe a comparação dos dois e deverá haver o menor número de imprecisão nas medidas, nenhuma defasagem, ou perturbação desconhecida.

A técnica de sensibilidade de trajetória permite obter parâmetros da máquina usando equações diferenciais que representam o sistema, sem a necessidade de parada do sistema, com a leitura da entrada no caso da máquina são tensões e correntes trifásicos da armadura e a leitura de saída, no caso a velocidade.

### 3.2.1 Função de sensibilidade de trajetória

Seja uma função  $y(t, p)$  o vetor solução de uma equação diferencial dependente do parâmetro  $p$ . Obtém-se a função de sensibilidade derivando o vetor solução pelo parâmetro dependente, dado por:



$$\frac{\partial y}{\partial p_i} = \lambda^i \quad (29)$$

Assim se determina cada função de sensibilidade em relação a cada parâmetro estimado. Se a variação do parâmetro alterar muito a saída se diz que a saída é muito sensível ao parâmetro. As funções de sensibilidade de maior valor tendem a convergir mais rapidamente já que alteram mais a saída, e as funções pouco sensíveis demoram mais a convergir.

### 3.2.2 Função de sensibilidade de trajetória para sistemas dinâmicos não linear

Considere o modelo não linear:

$$\dot{x} = f(x(t), p, u(t)) \quad (30)$$

$$y(t) = g(x(t), p, u(t)) \quad (31)$$

Onde,  $x$  é a variável de estado,  $y$  a variável de saída e  $u$  a entrada do sistema,  $p$  é o vetor de parâmetros a ser determinado,  $f$  e  $g$  são funções não lineares diferenciáveis em relação a  $p_i$  - a  $i$ -ésima componente do vetor  $p$ . As equações de sensibilidade das variáveis de estado e das variáveis de saída são calculadas ao derivar o sistema de equações (31) por cada parâmetro  $p_i$ :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial x} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (32)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial x} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (33)$$

A solução do sistema diferencial (32) e (33) fornece as funções de sensibilidade de entrada  $\frac{\partial x(t)}{\partial p_i}$  e  $\frac{\partial y(t)}{\partial p_i}$ , respectivamente.

Caso  $f$  ou  $g$  não forem diferenciáveis em relação a  $p_i$ , pode-se calcular a derivada usando a definição.

$$\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} = \frac{x(t, p_i + \Delta p_i, u) - x(t, p_i, u)}{\Delta p_i} \quad (34)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial p_i} = \frac{y(t, p_i + \Delta p_i, u) - y(t, p_i, u)}{\Delta p_i} \quad (35)$$

Onde  $y_1(t)$ ,  $x_1(t)$ , são resposta, no tempo, do modelo descrito pelas equações 30 e 31, e  $\Delta p_i$  uma pequena variação no parâmetro  $p_i$  como referência usa-se  $\Delta p_i = p_i/1000$

### 3.2.3 Processo de minimização do erro

Esse processo minimiza a diferença entre o sistema real (medida representada por  $\omega(t)$ ) no diagrama de bloco figura 9) e o sistema do modelo matemático.

O erro  $J(p)$  pode ser calculado usando método de mínimos quadrados usando a equação:

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_0^T (y(t) - w(t))^t (y(t) - w(t)) dt \quad (37)$$

O fator  $1/2$  é só para a facilitação dos cálculos.

O problema de otimização pode ser resolvido calculando a derivada parcial de  $J(p)$  em relação a seus parâmetros e igualando esta expressão a zero,

$$\frac{\partial J(p)}{\partial p} = 1/2 \int_0^{T_0} \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right)^t (y - w) dt + (y - w)^t \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right) dt \Big|_{p=p_0} \quad (38)$$

Os dois termos dessa integral são escalares e iguais, podem sofrer a seguinte simplificação.

$$G(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p} = \int_0^{T_0} \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right)^t (y - w) dt \quad (39)$$

E expandido  $G(p)$  em série de Taylor em torno do ponto  $p = p_0$  e considerando apenas até o termo de primeira ordem tem-se:

$$G(p) = G(p_i) + \frac{\partial G(p_i)}{\partial p_i} \Delta p + \dots = 0 \quad (40)$$

$$G(p) = G(p_i) + \frac{\partial G(p_i)}{\partial p_i} \Delta p = 0 \quad (41)$$

Substituindo  $\frac{\partial G(p)}{\partial p}$  por  $\Gamma$  na segunda parte da equação anterior

$$\Gamma \Delta p = -G(p_i) \quad (42)$$

Isolando o  $\Delta p$  tem-se:

$$\Delta p = -\Gamma^{-1}G(p_i) \quad (43)$$

Os parâmetros são ajustados para i-ésima interação por:

$$p_{(1+i)} = p_i - \Gamma^{-1}_{(i)}G(p_i) \quad (44)$$

A matriz  $\Gamma$  pode ser calculada derivando-se a equação 39. Assim tem-se:

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^T \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right)^t (y - w) dt \big|_{p_0} \quad (45)$$

$$\Gamma = \int_0^T \left( \frac{\partial^2 y}{\partial p^2} \right)^t (y - w) dt + \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right)^t \frac{\partial y}{\partial p} \big|_{p_0} \quad (46)$$

Desprezando o termo de segunda ordem:

$$\Gamma = \int_0^T \left( \frac{\partial y}{\partial p} \right)^t \frac{\partial y}{\partial p} dt \big|_{p_0} \quad (47)$$

Observa-se que a nova estimativa do parâmetro  $p_{(i+1)}$  depende de  $\Gamma(p)$  e  $G(p)$  que depende das derivadas  $\left( \frac{dy}{dp_i} \right)$  ou sensibilidade, por isso o nome de sensibilidade de trajetória.

Finalmente, transformam-se as integrais em somatório por serem termos discretos.

### 3.2.4 Software para estimar os parâmetros mecânicos

O software utilizado para este propósito foi desenvolvido pelo professor Elmer Pablo Tito Cari denominado Generator Parameter Estimation v1.0

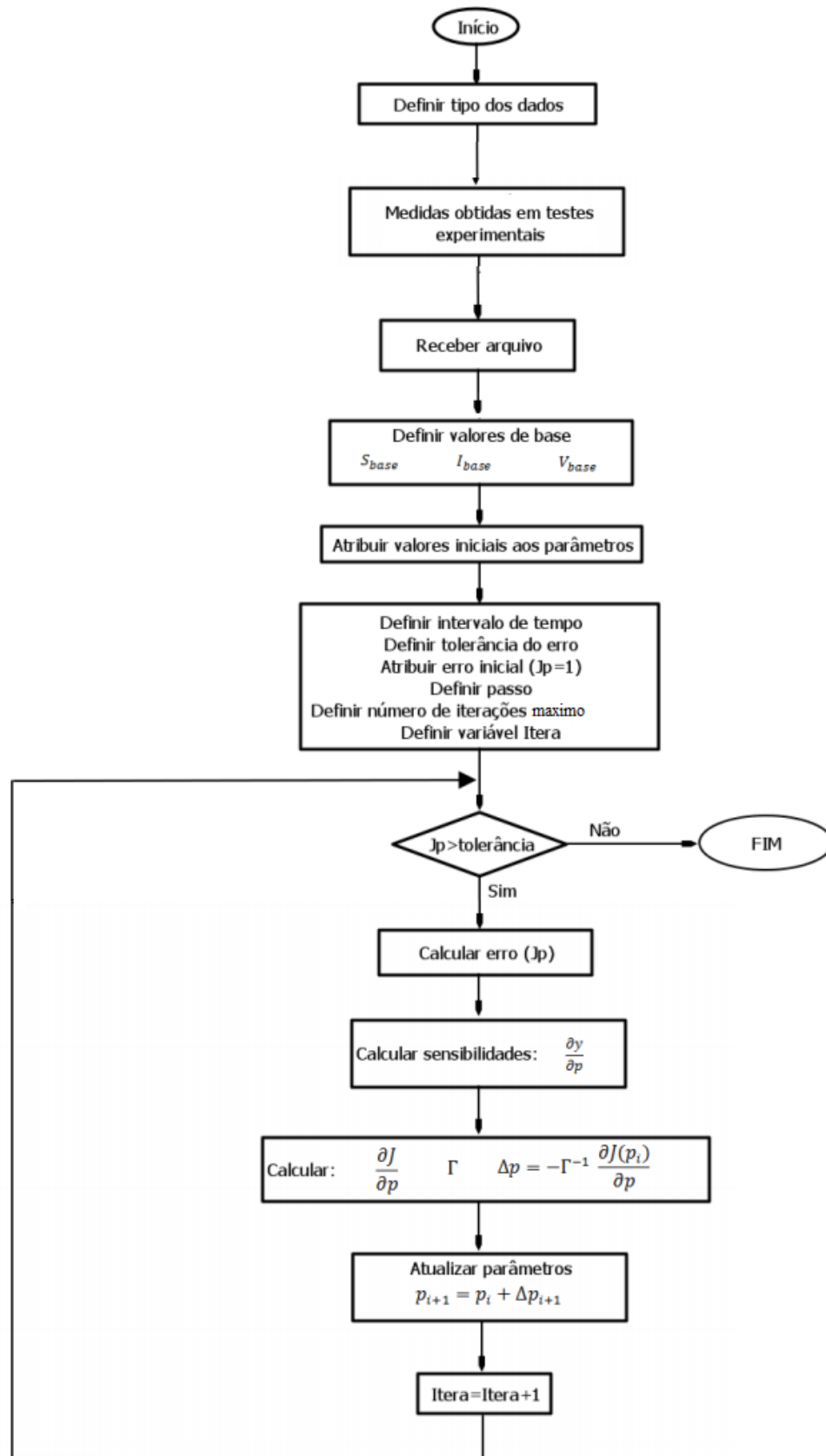


Figura 10- Fluxograma referente ao programa Generator Parameter Estimation v1.0

## 4 Ensaios em laboratório e resultados

### 4.1 Implementação do laboratório e análise de medidas

A etapa experimental foi conjuntamente desenvolvida com ajuda de uma equipe composta de o aluno de Iniciação Científica Écyo Farias bolsista FAPESP e coordenado pelo professor Elmer Cari.

O sistema elétrico de potência pode ser simulado com dois geradores, transformadores e cargas. Os geradores do laboratório são acionados por máquina de CC, analogamente às águas das usinas que são usadas para mover as turbinas, no caso das hidroelétricas a água está no estado líquido, no caso das usinas térmicas normalmente usa-se vapor de água desmineralizada.

Então o objetivo do laboratório é montar um sistema que pode servir com um instrumento prático, para o desenvolvimento de pesquisas e para a utilização do laboratório para os alunos da EESC (Escola de Engenharia de São Carlos), em quase todas as áreas da engenharia elétrica na ênfase de sistema de energia e automação.

A montagem foi dividida em etapas. Primeiramente elaborou-se um projeto, esquema de ligações, equipamentos necessários, cotação de preço dos instrumentos, etc.

O esquema de ligação pode ser encontrado na figura 11.

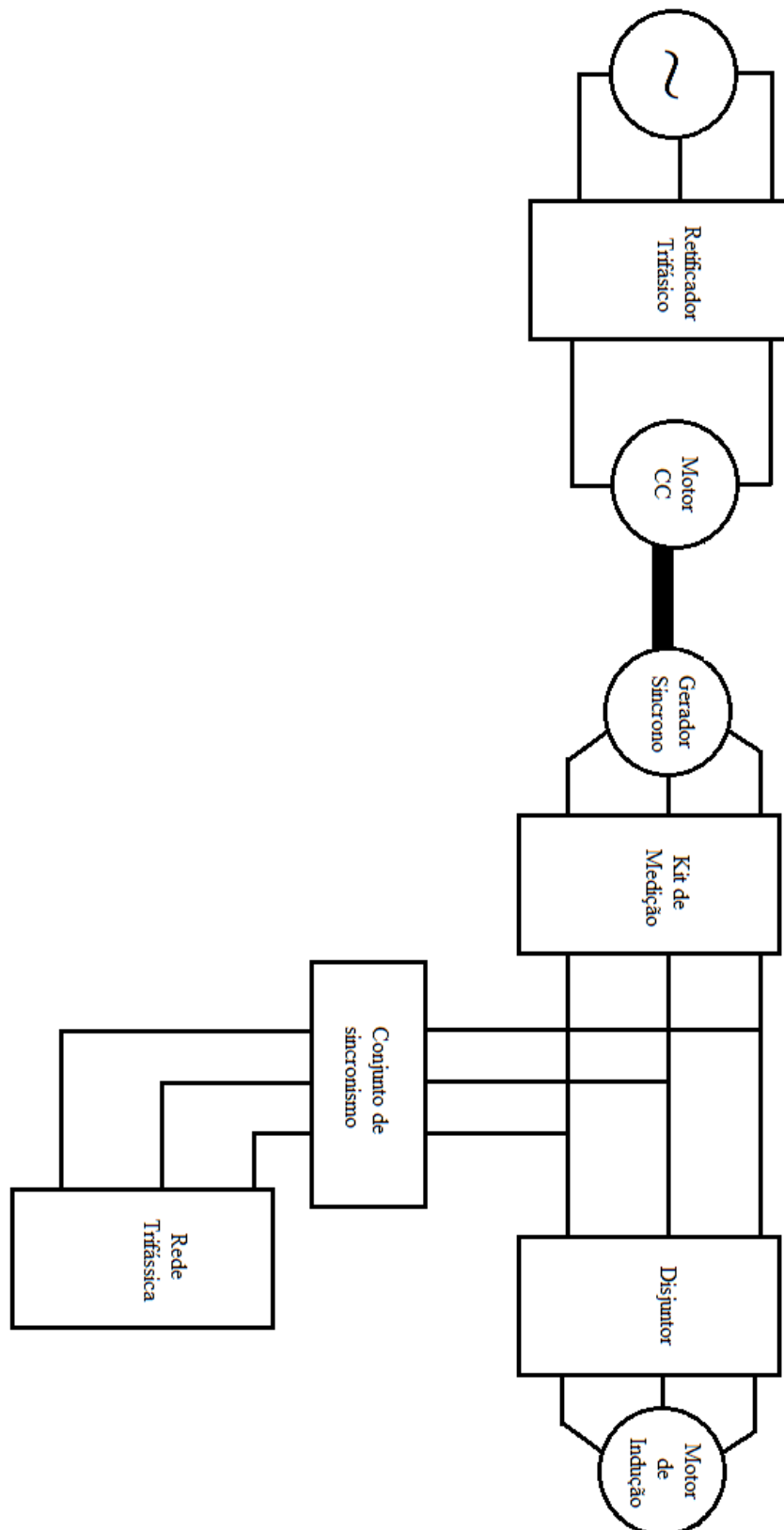


Figura 11 - esquema de ligação

Os equipamentos usados foram:

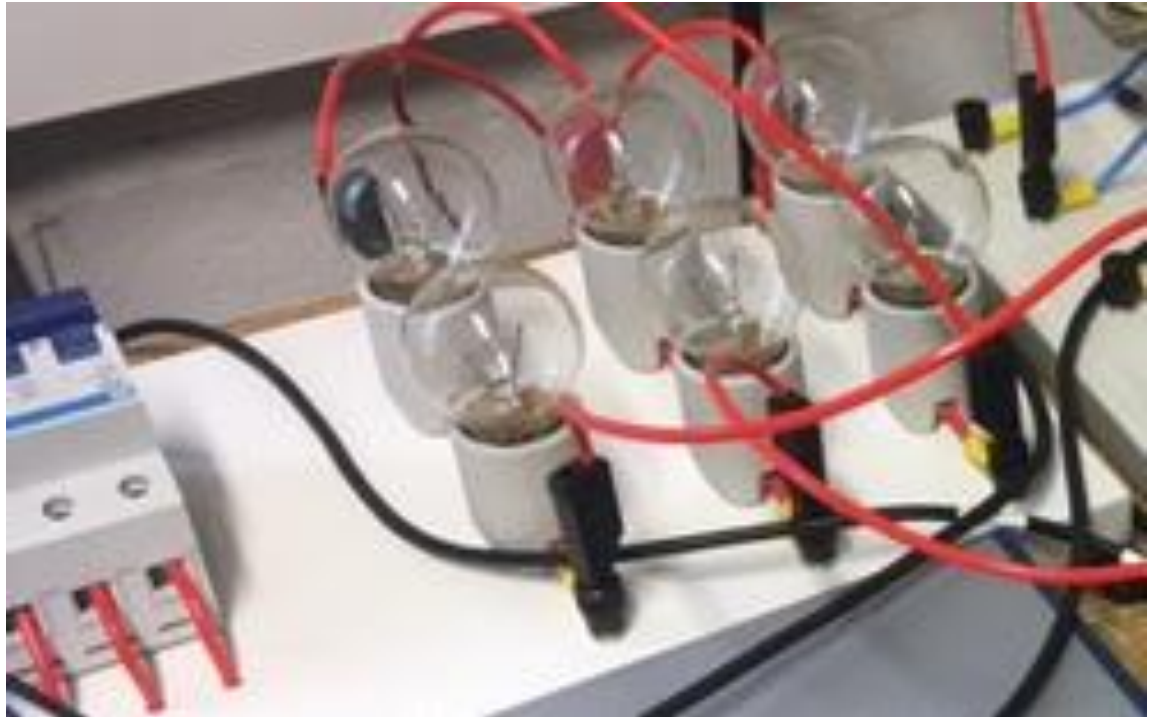
Equipamento	Quantidade
Fonte trifásica, 3kVA	2
Retificador trifásicos	2
Fonte monofásica 1kVA	3
Transformador de corrente 1:8	7
Transformador de potencial 1:30	6
Capacitores 220 $\mu F$	6
Fio	200m
Borne	200
Disjuntor trifásico 30A	5
Plug Banana	240
Lâmpadas 220V 40 W	14

#### 4.1.1 Montagem dos equipamentos nas placas

Como é um laboratório didático, todos os equipamentos são ligados em placas de madeira compensada, ligados com bornes e cabos com plugs banana. Tudo para fácil ligação, conferência, arrumação. Foram soldados quase todos os equipamentos para os bornes, salvo a ligação trifásica em estrela-estrela dos transformadores de potência (TP, figura 12) e o disjuntor das lâmpadas de sincronização (figura 13).



Figura 12 - Transformador de Potência e de Corrente



*Figura 13 - Conjunto de Sincronização*

#### 4.1.2 Calibragem do transformador de corrente

Cada equipamento foi testado individualmente. O Transformador de corrente (TC) foi ajustado a resistência que é ligado no secundário, a ponto de a corrente de partida não danificar a placa de aquisição. Ligando a fonte monofásica em série com uma resistência em série com o transformador de corrente (TC) em série com amperímetro, figura 14. Foi traçado uma reta para diferentes tensões no secundário e diferentes correntes no primário. Foi calculado a resistência ideal para a partida direta do motor, não danificar a placa de aquisição. Foi encontrado o fator de corrente  $k_I = 8$ , ou seja corrente no primário 8 vezes maior que a o secundário.



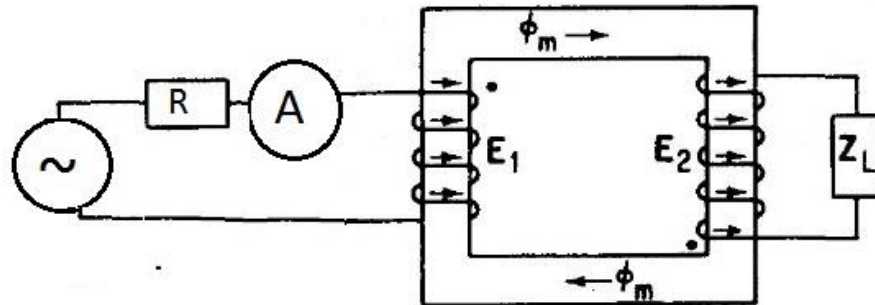


Figura 14- Representação do ajuste do TC

#### 4.1.3 Calibragem de transformador de potencial

Os transformados de potencial foram ligados a uma fonte monofásica e foram medidas a tensão primária e secundária do transformador com um voltímetro. Foi encontrado o fator de transformação  $k_t = 30$ .

#### 4.1.4 Software usado para a aquisição de dados

A *National Instruments* é a empresa que fornece o equipamento de interface entre os transformadores e o computador, via ligação USB. Com o equipamento, a empresa fornece o software Labview.

Labview é um ambiente de programação baseado em interface gráfica. A estrutura da programação é escrita em blocos de comandos, com cada bloco se conectando junto com outro para executar comandos.

O LabVIEW foi usado para a aquisição de dados e visualização deles na tela para rápida conferencia, a figura. E utilizado o MATLAB para o tratamento de dados e utilização do *software Generator Parameter Estimation v1.0* utilizado em [6].

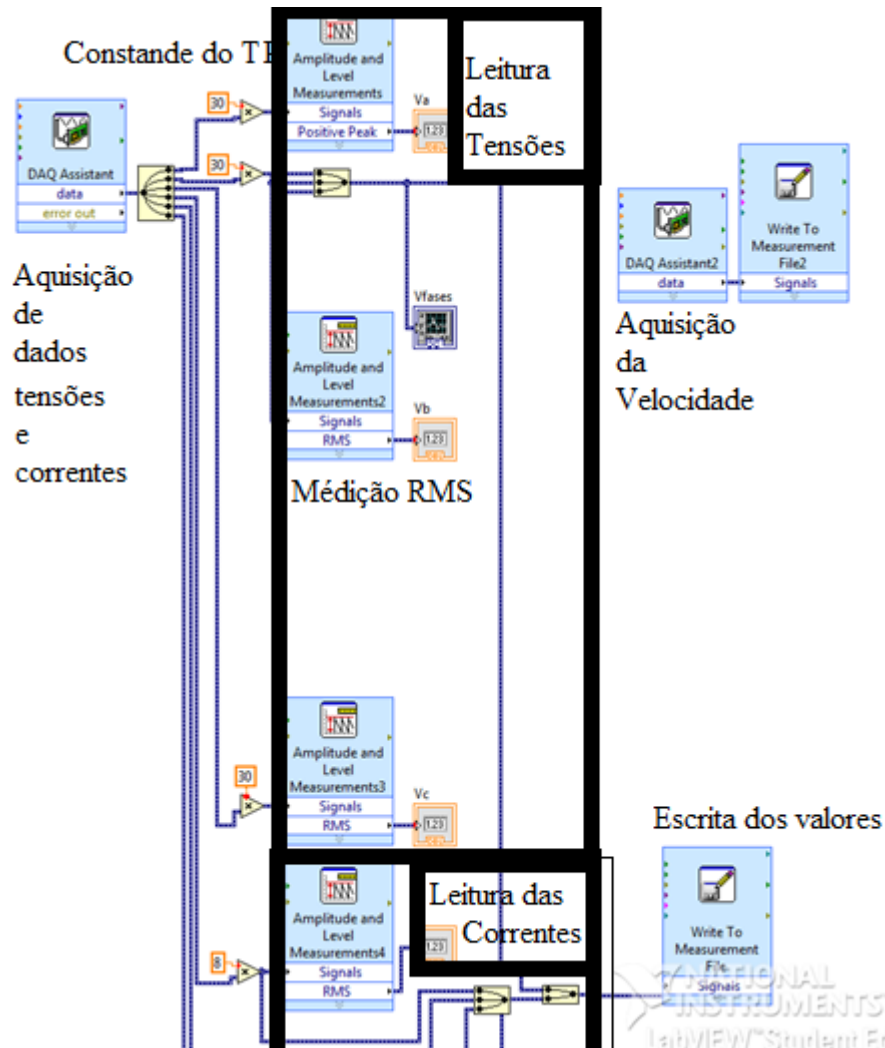


Figura 15 - Programação do LabView

#### 4.1.5 Filtragem de ruído de tensão e corrente

O sinal de tensão e corrente ligado diretamente da máquina e conectado à rede, foi observado uma deformação na onda senoidal, figura 15. Com o software MATLAB, foi feita a transformada de Fourier (figura 16), que divide o sinal em vários senos com diferentes amplitudes e frequências.

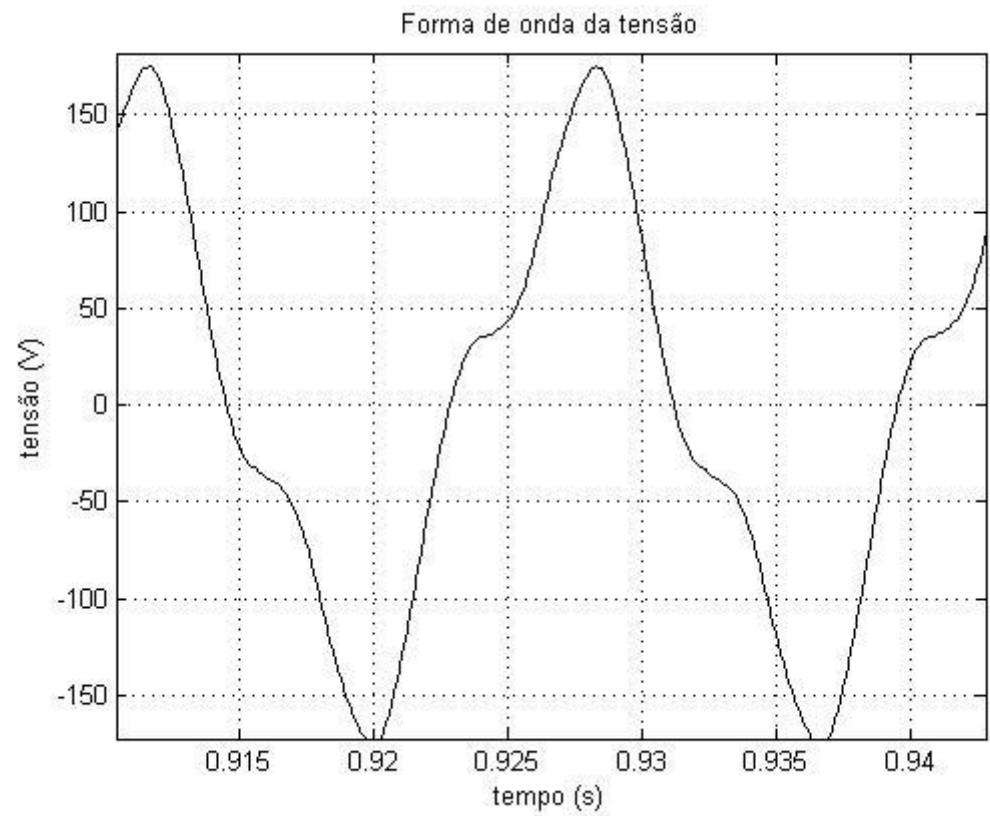


Figura 16 - Forma de onda da tensão no terminal do gerador

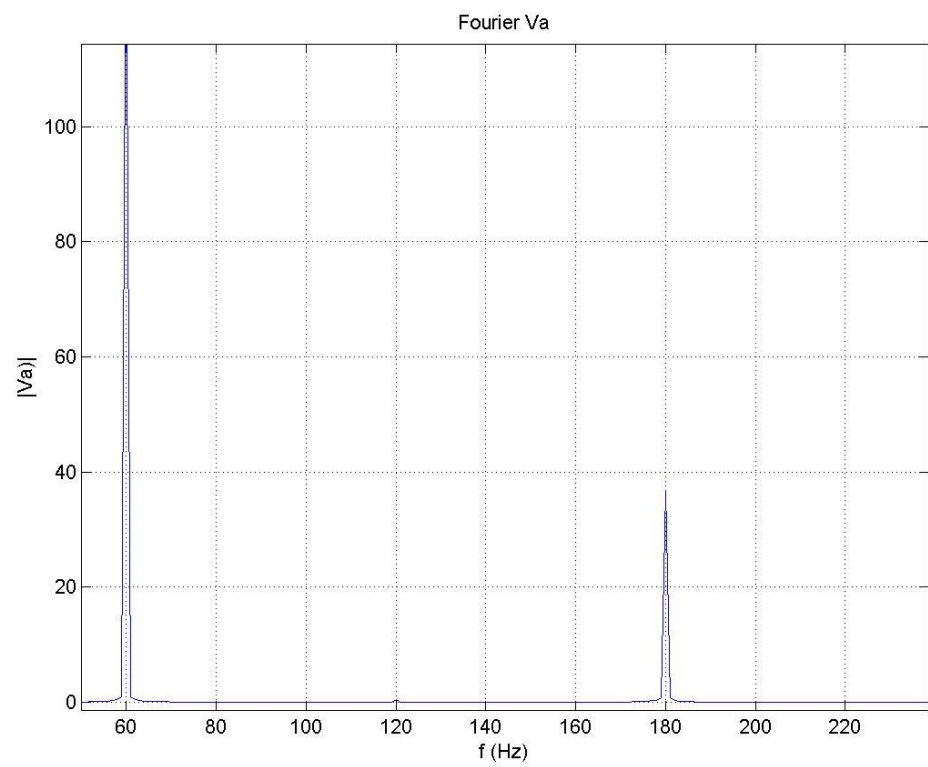
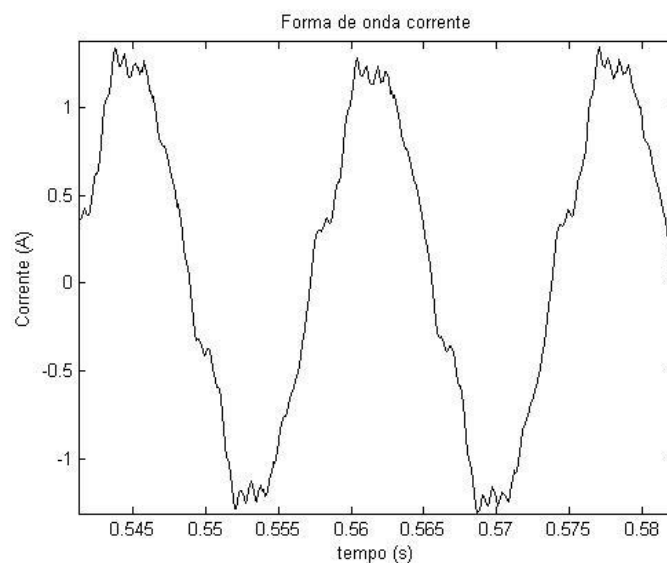


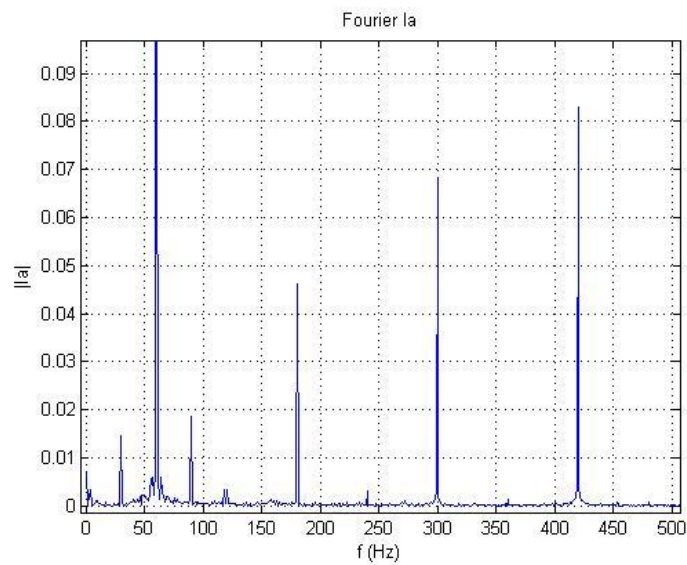
Figura 17 - Análise de Fourier da tensão no terminal do gerador

Foi observado um harmônico, de terceira ordem no sinal da tensão, que possivelmente poderia ter sido evitado com a ligação em delta no TP e no enrolamento do gerador de síncrono. Por facilidade da existência de um ponto neutro na ligação estrela foi feita a ligação estrela-estrela, poderia ter sido usado um filtro de passa baixa com frequência de corte em torno de 100 Hz, para não variar a frequência fundamental e elimina as frequências mais altas. No trabalho foi visto que o filtro de Butterwoth de segunda ordem é suficiente.

O sinal da corrente no terminal do gerador foi observado nas figuras 17 e 18, harmônicos de terceira, quinta e sétima ordem. Que também poder eliminado com um filtro passa baixa. Além dos harmônicos observou uma frequência, pequena mais existem de ordem  $\frac{1}{2}$  e  $1 + \frac{1}{2}$ , possivelmente causada pelo motor CC, já que é ele que dá o torque mecânico. Acredita-se que a cada volta, 30 Hz, existe um desbalanço na rotação que provoca um ruído de baixa frequência. Por influência da corrente e velocidade talvez não seja bom filtrar tais frequência. É aconselhado usar sempre o mesmo filtro em todas as medições para um correto defasagem de tempo.



*Figura 18 - Forma de onda da corrente do terminal do gerador*



*Figura 19 - Análise de Fourier da corrente do terminal do gerador*

A velocidade é medida com um encoder conectado do eixo do motor CC de 1024 pontos por volta, com a tensão de alimentação de 5 V.

A velocidade do eixo, com o gerador isolado da rede reflete todas as falhas do motor CC (observado na figura 17), muito harmônicos da ordem da velocidade da máquina, 30 Hz (figura 18). Um motivo que pode ter causado esse problema é o retificador monofásico do campo da máquina CC.

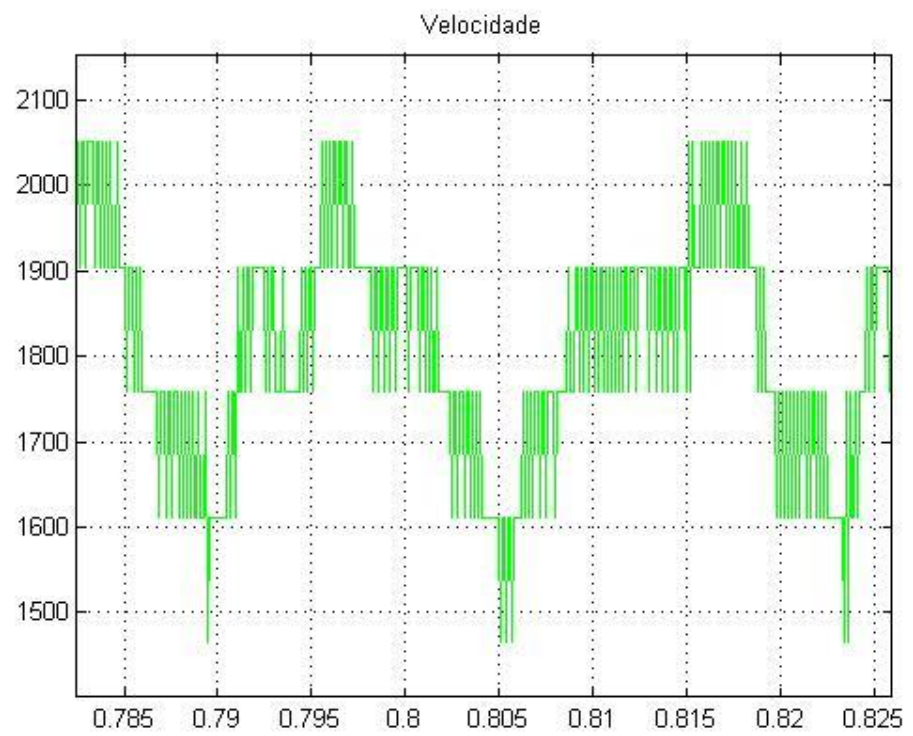


Figura 20- Forma de onda da velocidade

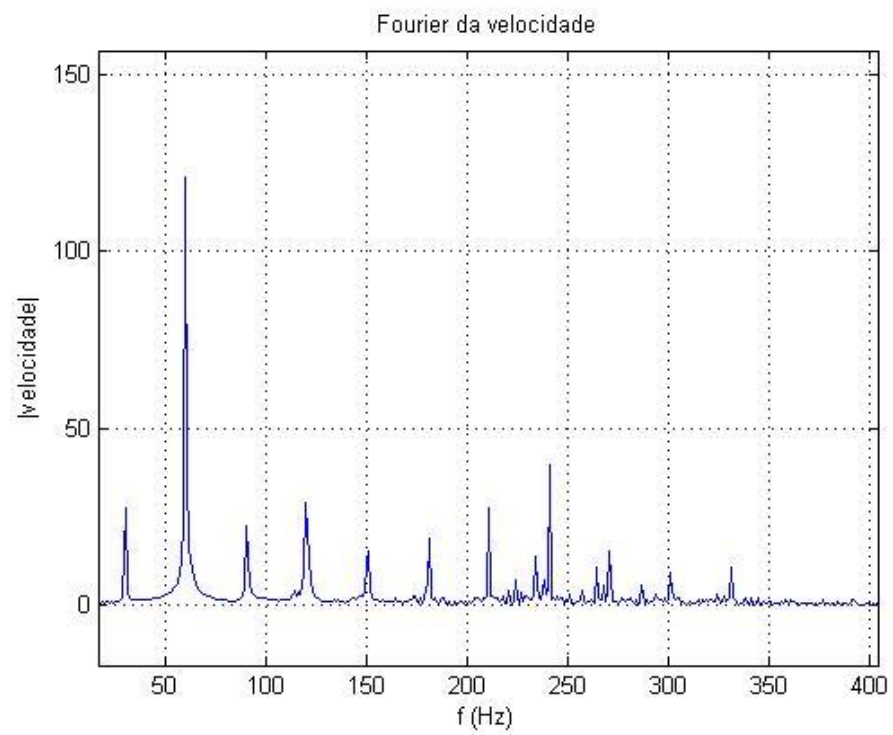
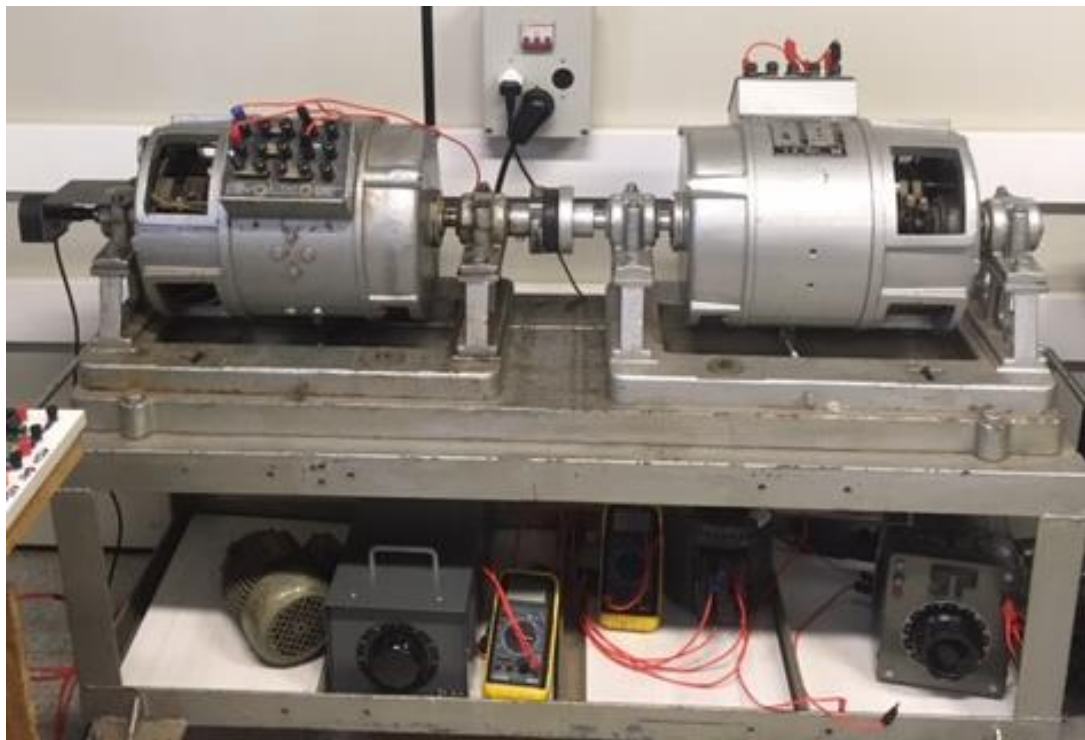


Figura 21 - Analise de Fourier da velocidade do gerador

## 4.2 Resultados dos métodos off-line

Nos testes foram utilizados o gerador síncrono trifásico conectado em estrela com o transformador de potencial de estrela para estrela, acoplado no eixo um motor CC para impulsionar o gerador, ver na figura 21, ligação real da figura 11. Com esse esquema se deseja encontrar os parâmetros do conjunto. Foi utilizado para aquisição de dados, uma placa com interface LabView e voltímetros, amperímetros, cosímetro para a confirmação e ajuste dos sinais requisitados. Com os dados de placa do gerador síncrono na Tabela 2



*Figura 22 - Sistema Gerador Síncrono (direita) e MCC (esquerda)*

*Tabela 1 - Dados de placa do gerador*

Tensão nominal	220 V
Corrente de armadura nominal	5 A
Potência	2 KVA
Velocidade	1800 rpm
Fator de potencia	0.8

Como grande parte dos testes são para adicionar um objeto com momento de inercia conhecido, desacoplar o rotor do eixo ou mudar a configuração da montagem das maquinas, não foram realizados por causa da dificuldade de fixação das próprias, falta de segurança em acoplação de outro material, imprecisão por ser baixa velocidade, entre outros.

#### 4.2.1 Resultado dos teste de desaceleração "Run-down test"

Para a determinação da constante de amortecimento, primeiro é obtido os valores de velocidade, tensão, corrente em regime e calculado o torque imprimido,  $k_e \phi$  constante elétrica e fluxo magnético e a constate desejada. Na tabela a seguir tem todos os valores, tabela 3.

*Tabela 2 - Valores Obtidos no "Run down test"*

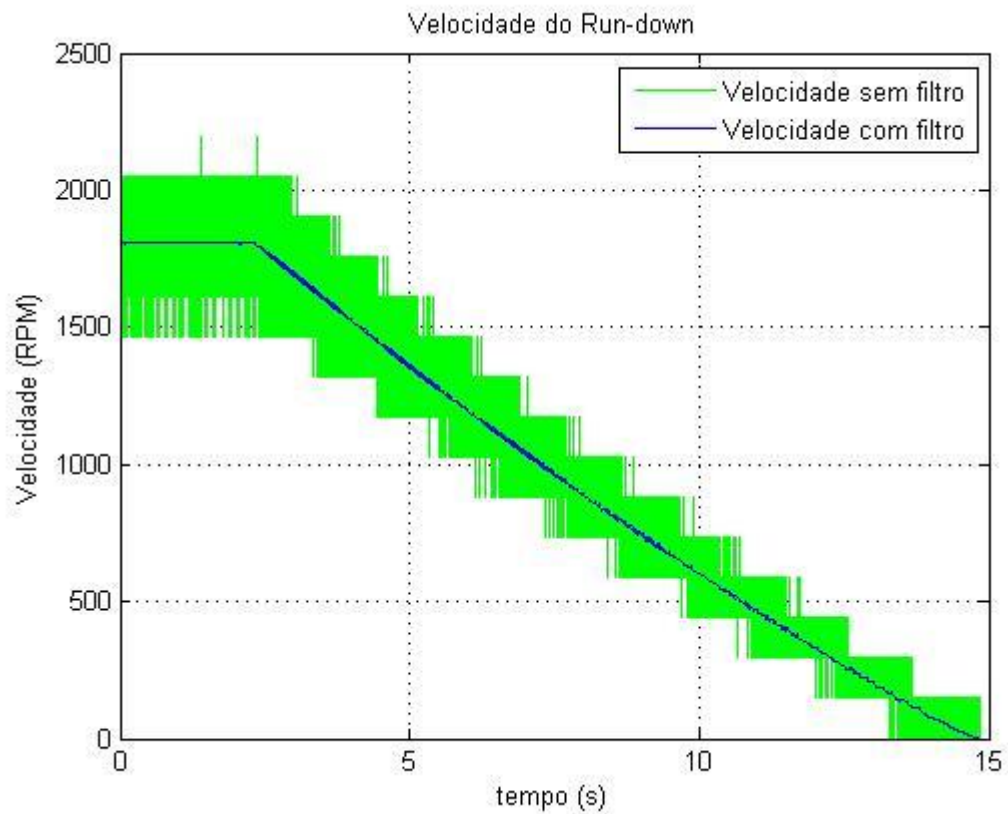
Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade (RPM)	Velocidade (rad/s)	Torque (Nm)	Amortecimento
30	0,04	233	24	1,19	0,05
60	0,16	481	50	1,33	0,02
90	0,25	737	77	1,41	0,02
121	0,32	1005	105	1,48	0,01
150	0,37	1240	129	1,55	0,01
180	0,44	1507	157	1,61	0,01
210	0,50	1757	183	1,68	0,01
221	0,52	1856	194	1,70	0,01

Temos o fluxo e a constante de amortecimento, como os valores convergiram próximos da operação (1800 RPM) será considerado esses valores.

$$D = 0,01 \text{ Nm}^2\text{s}$$

Agora, se faz a desaceleração do sistema e calcula o tempo de decaimento. A curva de decaimento é ilustrada a seguir:





*Figura 23 - Característica do decaimento da velocidade no "run-down test", com filtro e sem filtro*

Com o tempo de decaimento  $t_m = 7,4$  segundos e a constante  $D$  é possível calcular o momento de inércia.

$$J = 0,074 \text{ Nm}^2$$

Usando (12) pode-se determinar a constante  $H$ :

$$H = 0,657 \text{ s}^{-1}$$

#### 4.2.2 Resultado teste de desaceleração retardada ou "Retardation test"

Foram feitos dois ensaios, um sem carga e o outro com carga de  $171 \Omega$ , foram obtidos a velocidade do conjunto motor, gerador. A velocidade sem carga está expressa a seguir, figura 23.

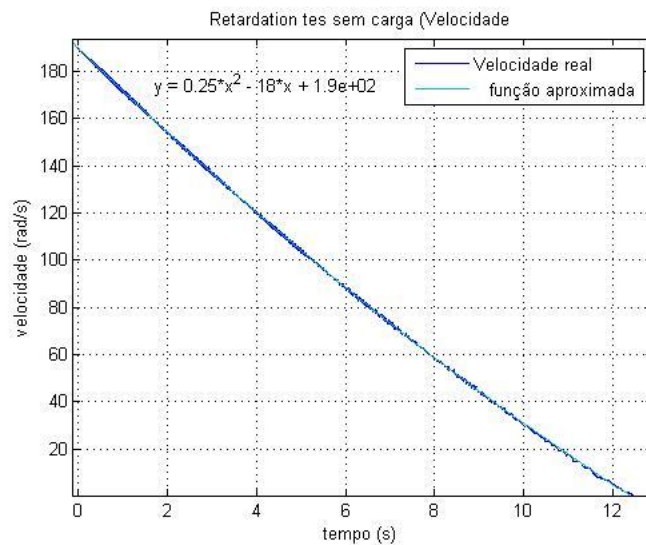


Figura 24 - Decaimento da velocidade em "retardation test" sem carga

Por causa do ruído (calculando pela definição da derivada de um sinal com ruído gerará outro sinal mais ruidoso), foi calculada a equação que se aproxima da função, e dessa pode-se obter a aceleração pela derivada da função,  $y = 0,25 x^2 - 18,4x + 190$ , obtida utilizando a função do MATLAB *basic fitting*, como ilustra a figura 24.

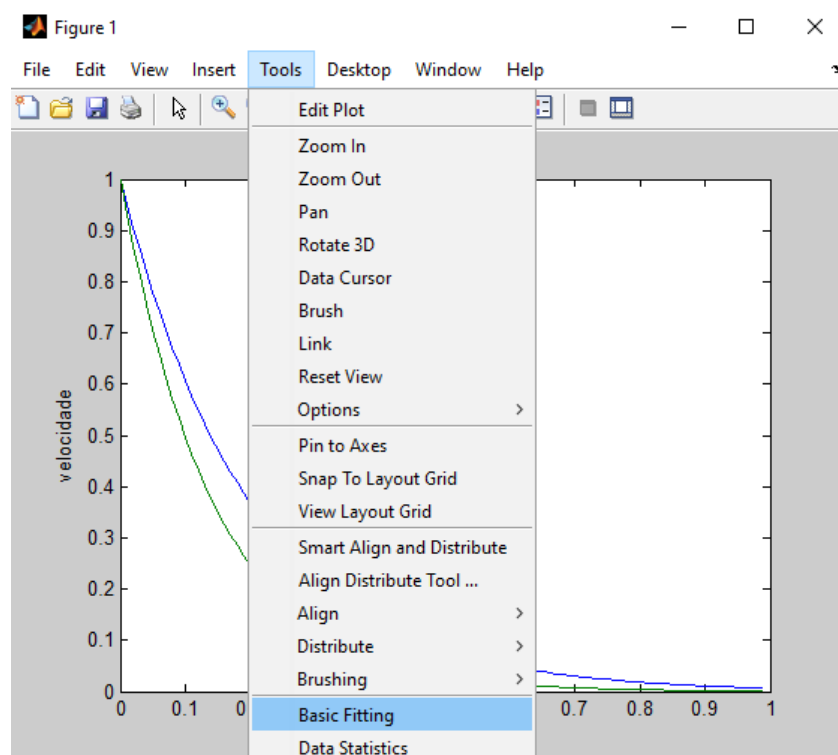


Figura 25 - Basic Fitting

A aceleração é a derivada da velocidade  $\frac{dy}{dx}=0,5x-18,4$ ,  $x$  é o tempo. Assim consegue-se a aceleração em qualquer ponto.

A velocidade com carga no motor CC é expressa a seguir:

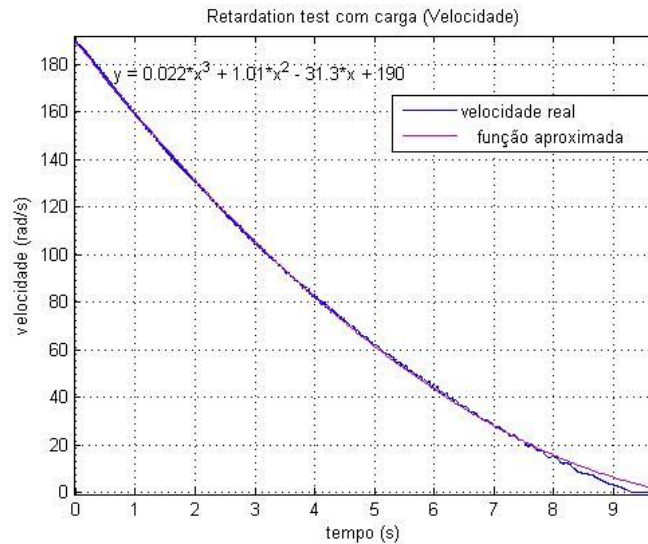


Figura 26 - Decaimento da velocidade em "retardation test" com carga

Com a aproximação para uma função quadrática o erro ficou elevado, então escolhido uma função cúbica e foi observado que mesmo aumentando o grau não melhorava consideravelmente o comportamento da velocidade, então foi escolhido com o menor grau que os pontos do começo até a metade da velocidade se coincida. A função ficou  $y=0,022x^3-31,3x+1,02x^2+190$ , aceleração  $\frac{dy}{dx}=0,066x^2-31,3+1,02x$ .

Usando a equação 28, na velocidade de 120 rad/s, o tempo atingir tal velocidade, com carga elétrica é 2,42 s e no sem carga 4,02 s usando as equações de aceleração: 16,49 rad/s<sup>2</sup> e 28,45 rad/s. Tensão induzida na armadura vale 134,4. Utilizando a equação 28, obtém-se:

$$J = 0,073 \text{ Nm}^2$$

Utilizando a equação (12):

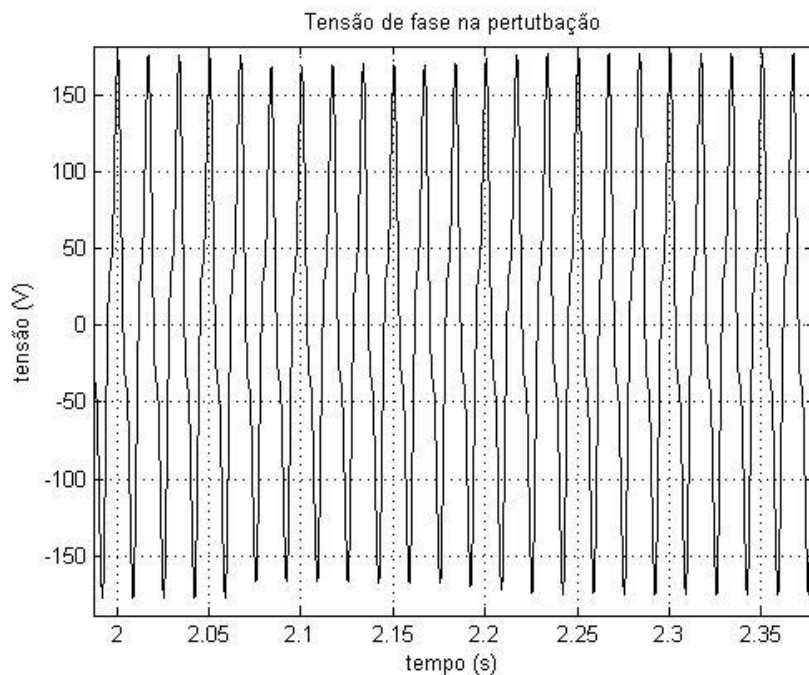
$$H = 0,648 \text{ s}^{-1}$$

### 4.3 Teste de Sensibilidade de Trajetória

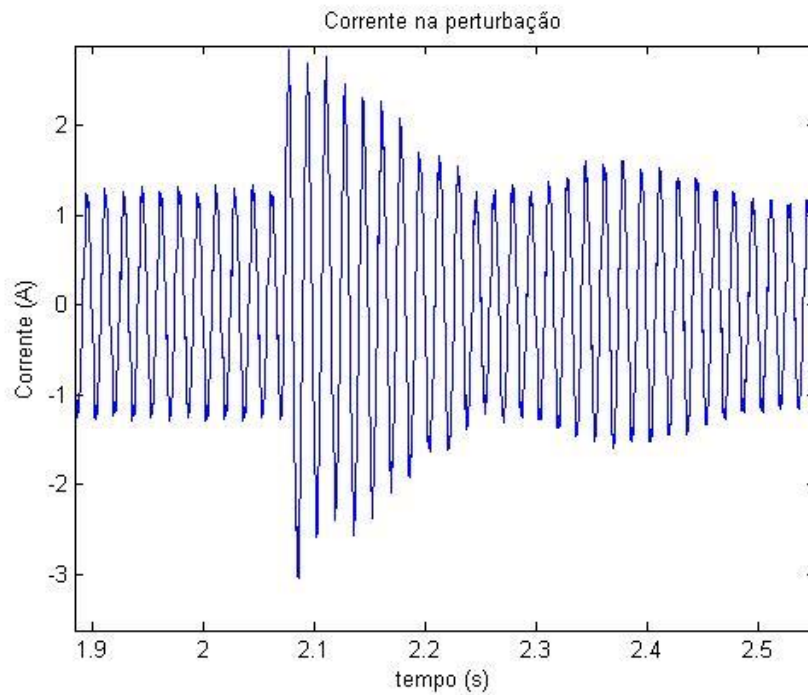
No laboratório, o sistema motor CC e gerador síncrono foram acionados. O procedimento de partida do sistema é: ligando o campo do motor CC em 350 mA, aumentar a corrente de armadura até 1800 rpm, adicionar tensão CC no campo do gerador síncrono até a saída de 220 V na tensão de armadura.

Com o sistema acionado e conectadas as lâmpadas de sincronização, verificar se todas as lâmpadas estão apagadas e liga o circuito à rede (barramento infinito). Verifica com o wattímetro e amperímetro se o gerador está gerando energia para rede e garantir que o gerador sofreu uma perturbação com a carga não foi totalmente amortecido pela rede.

Com tudo em estado de operação, faz-se uma perturbação com o motor de indução de 2 hp, como mostra o esquemático da figura 11. No total são feitos 3 ensaios, mas só será apresentado um pelo fato da perturbação não acontecer ou causa o mesmo resultado de outra perturbação. No caso é apresentado a condição do motor entrar no sistema e permanecer. Assim são monitoradas suas tensões e correntes, figura 26 e 27.

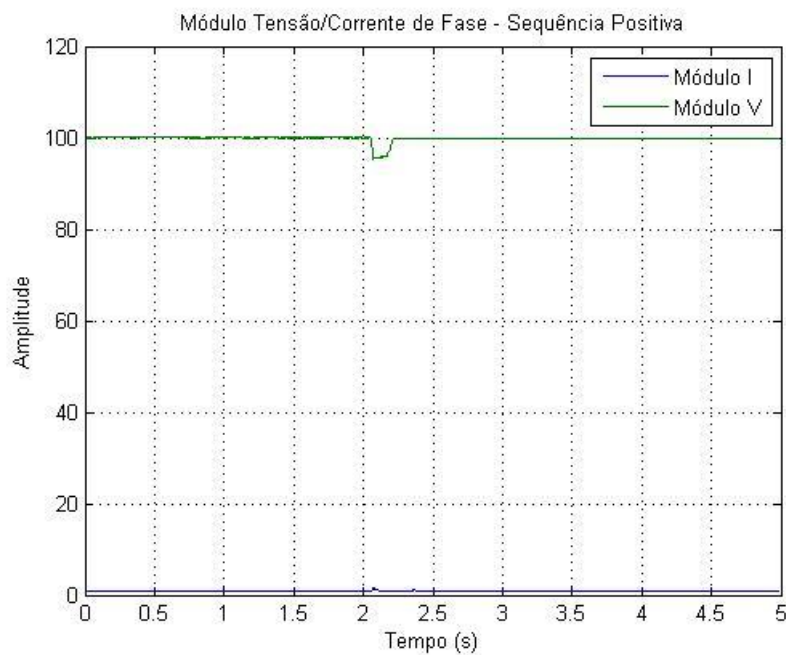


*Figura 27 - Tensão no acontecimento da perturbação no terminado do gerador*

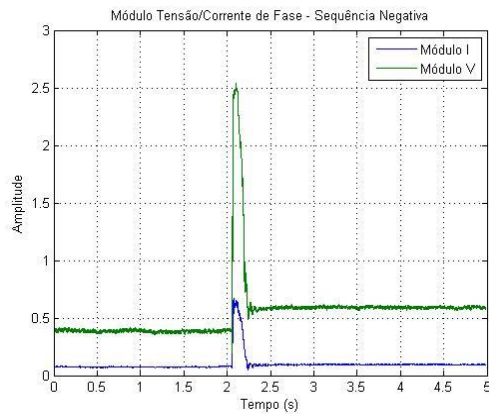


*Figura 28 - Corrente da perturbação no terminal do gerador*

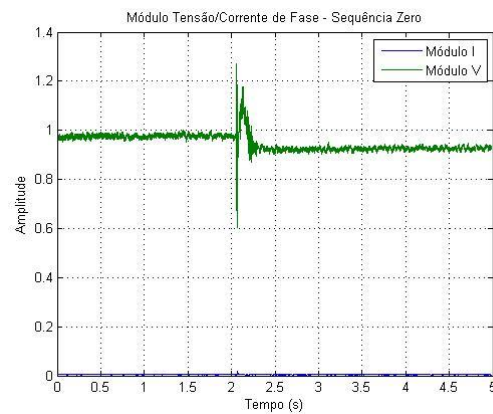
Com todos os sinais trifásicos são calculados os fasores, magnitude (rms) e defasagem, decompondo em sequência positiva, negativa e zero. Em seguida calcula-se potência positiva, negativa e zero, de cada fase (como estão na sequência positiva e são representações de cada fase, basta multiplicar por 3 para total).



*Figura 29 - Fator de tensão e Corrente na sequência positiva no terminal do gerador*

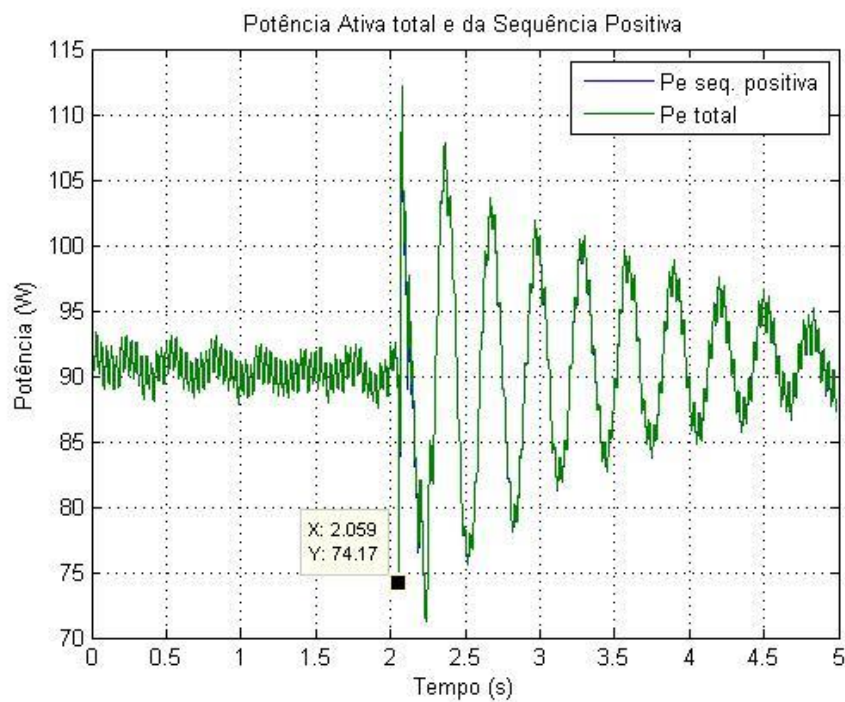


*Figura 30 - Fasor de tensão e Corrente na sequência negativa*



*Figura 31 - Fasor de tensão e Corrente na sequência zero*

Praticamente só existe tensão e potência na sequência positiva como pode ser visto nas figuras acima (figuras 28, 29 e 30), o que quer dizer que o gerador está balanceado.



*Figura 32 - Potência ativa de uma fase na sequência positiva*

Com o tempo, potência e velocidade adquiridas é usado o algoritmo desenvolvido pelo Professor Doutor Elmer Tito Pablo (fluxograma da figura 10, página 20).

O vetor de parâmetros a ser estimado é  $p = [H \ D]$ ,

$$H = \frac{0,5J\omega_c^2}{S_b}$$

$\omega_c$  Velocidade síncrona,  $S_b$  potência base é igual a 2 kVA.

O resultado obtido foi:

$$J = 0,075 \text{ Nm}^2$$

$$D = 0,0125 \text{ Nm}^2\text{s}$$

$$H = 0,6680 \text{ s}^{-1}$$

Com o modelo chegando próximo do real, erro calculado com a norma 2 menos que 0.001 ele convergiu com ilustra a figura 32.

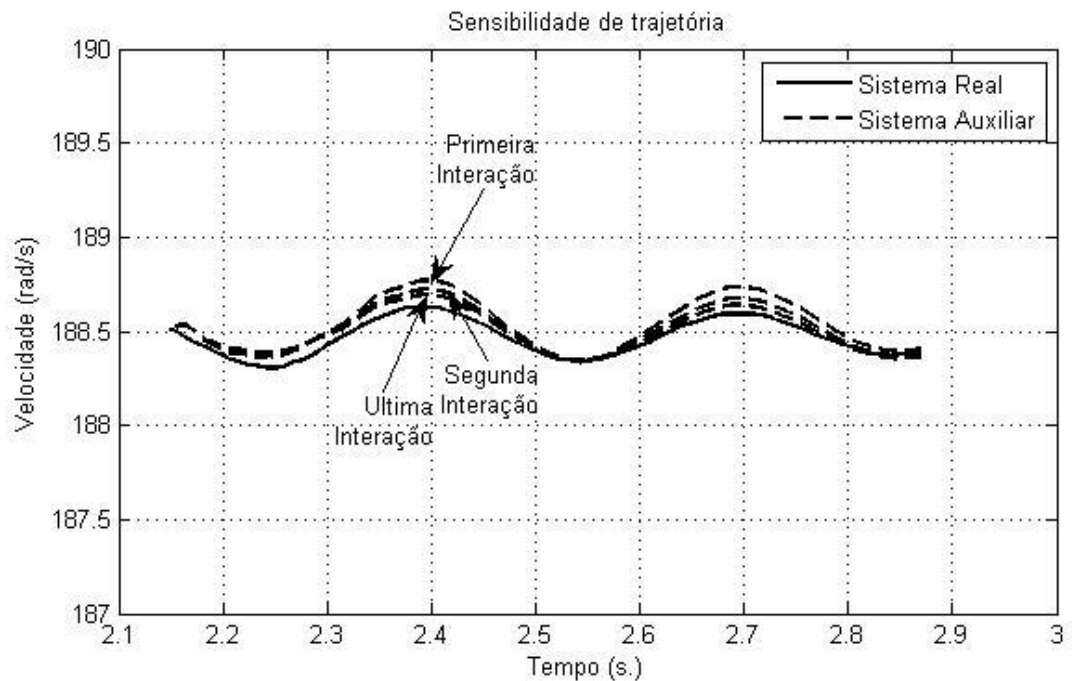


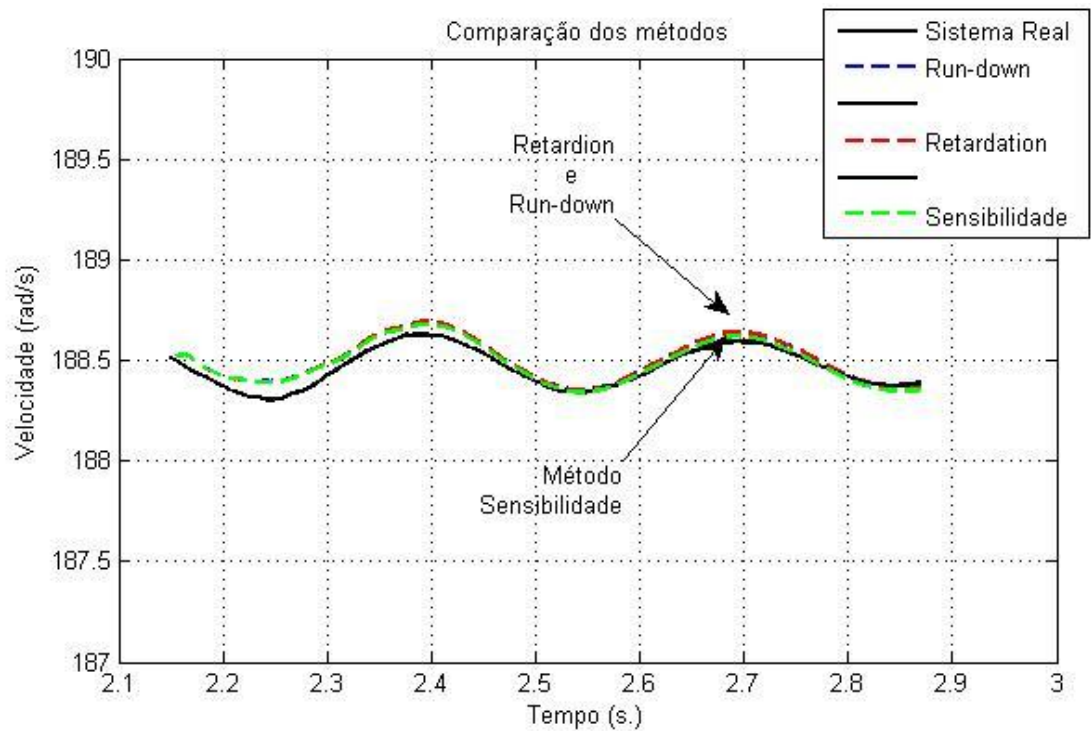
Figura 33 - Resposta (velocidade) das simulações e do sistema real

#### 4.4 Comparação

Os resultados foram:

	Run-down teste	Retardação teste	Sensibilidade de Trajetória
J [Nm <sup>2</sup> ]	0,074	0,073	0,075
D [Nm <sup>2</sup> s]	0,01	--	0,0125
H [s]	0,657	0,648	0,668

Os resultados foram muito próximos e não existiu um teste mais preciso que o outro. O teste de sensibilidade de trajetória foi satisfatório, nota-se diferença nos resultados não uniforme, o que pode ter sido ocasionado por a aquisição de dados ruidosos e harmônicos podem ter prejudicado a precisão do valor.



*Figura 34 - Comparação dos resultados com simulação*

Na figura 33 é expressa a velocidade medida e as simulações com o valor de cada teste. Como pode observar os valores não são distante mais o método de sensibilidade é o que mais se aproxima do sistema real. Apesar da diferença ser pequena um resultado mais próximo do real pode melhorar uma ação feita pelo sistema de operação.



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, para a obtenção dos parâmetros mecânicos, constante de inercia e constante de amortecimento, foram aplicadas técnicas convencionais de determinação experimental e a técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória.

Por facilidade de implementação dos experimentais, foram realizados os seguintes métodos *off-line* foram: método de aceleração retardada, método de desaceleração ou “*Retardation test*” e “*Run down test*”. Além disso foi utilizada o método *on-line* baseado em sensibilidade de trajetória.

Os resultados dos testes mostraram os valores dos parâmetros ficaram próximos tanto dos testes *off-line* como do teste *on-line*, sendo considerados, portanto, satisfatórios. As análises dos testes *off-line* são realizadas em condições similares. Por outro lado, o teste *on-line* baseado em sensibilidade de trajetória, apresenta mudanças de variáveis e modo inovador de aproximação com o valor exato.

A dificuldade enfrentada foi a presença de ruídos na medida de velocidade sendo necessário, portanto, a utilização de um filtro, procedimento que influenciou na precisão dos parâmetros mecânicos estimados.

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Identificar ruídos causado pelo acionamento do motor CC e eliminá-lo
- Implementação do controle de velocidade do motor CC e fazer a modelagem
- Validação do método de sensibilidade de trajetória para o gerador com carga máxima
- *Soft-start* para o gerador síncrono conseguir partir e funcionar como motor
- Automatização do kit de sincronismo, sem a necessidade de uma pessoa fechar o circuito

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] IEEE (1995). Guide test procedures for synchronous machines, Technical report, Std 115-1995, Power Engineering Society.
- [2] IEEE (2002). Guide for synchronous generator modeling practices and applications in power system stability analysis, Technical report, Std. 1110-2002, Power Engineering Society.
- [3] Oliveira, Vilma A., Manoel L. Aguiar, e Jerson Barbosa de Vargas. *Sistemas de controle: aulas de laboratório*. EESC-USP, 2005.
- [4] Paul I-Hai Lin e Edward E. Messal ; “Design of a Real-time Rotor inertia Estimation system for DC Motors with a Personal Computer.” 8th IEEE Conference Record., IMTC 14-16 May 1991
- [5] Adalberto Correia; “Estimação de Parâmetro Mecânico de Motores de Indução trifásico com Rotor em Gaiola de Esquilo”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia elétrica, ISEC 2014
- [6] Cari, E. P. T., “Metodologia de estimação de parâmetros de sistema dinâmicos não-lineares com aplicação em geradores síncronos.” Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- [7] Bretas, Newton Geraldo, e Luís Fernando Costa Alberto. *Estabilidade transitória em sistema eletro-energéticos*. EESC/USP, 2000.
- [8] Underwood, Samuel J., e Iqbal Husain. "Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57.7 (2010): 2435-2443.
- [9] Toliyat, Hamid A., Emil Levi, and Mona Raina. "A review of RFO induction motor parameter estimation techniques." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 18.2 (2003): 271-283.