

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Ajuste de Parâmetros para Modelos Típicos de Reguladores de Frequência, Recorrendo à Resposta Dinâmica do Modelo

Alexandre Manuel Pinheiro Calejo Pires

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dra. Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos

Junho de 2012

© Alexandre Manuel Pinheiro Calejo Pires, 2012

Resumo

Este trabalho pretendeu resolver um problema que usualmente ocorre quando se pretende efetuar a simulação dinâmica de um sistema elétrico real: obter os valores dos parâmetros para um modelo típico do regulador de frequência local de uma máquina síncrona, disponível em ferramentas de simulação dinâmica, quando o modelo fornecido pelos fabricantes não corresponde a nenhum dos modelos típicos.

Pretendeu-se resolver este problema recorrendo ao ajuste do valor dos parâmetros do modelo típico, com o objetivo de minimizar as diferenças da resposta dinâmica fornecida pelos dois modelos (o típico e o fornecido pelo fabricante).

Esta resolução foi efetuada recorrendo à aplicação do método de otimização EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization) em ambiente Matlab.

A qualidade dos resultados obtidos foi comprovada através da comparação da resposta temporal fornecida, por cada um dos modelos de regulação de frequência (o típico ajustado e o fornecido pelo fabricante), tendo-se recorrido para isso à plataforma de simulação Simulink disponível no Matlab.

Abstract

The purpose of this work is to solve a problem that often occurs when making a dynamic simulation of a real electric system: to obtain the numeric parameters for a typical model of the local frequency regulator of a synchronous machine, available in dynamic simulation tools, when the model delivered by the maker doesn't match any of the typical models.

I tried to solve the problem by adjusting the values of the parameters of a typical model, with the objective of minimizing the differences in the dynamic response between the two models (the typical one and the one delivered by the maker).

This solution was executed using the optimization method EPSO (Evolutionary Particle Swarm optimization) in Matlab environment.

The quality of the obtained results was validated by comparing the delivered temporal response for each the models of frequency regulation (the typical one adjusted and the one delivered by the maker), to do this, I used the simulation platform Simulink, available in Matlab.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos, pelo apoio e preciosos conselhos dados durante a realização deste trabalho.

Gostaria também de agradecer a toda a minha família, em especial à minha mãe e ao meu irmão pelo apoio que sempre me deram ao longo da minha vida.

Por último, gostaria de agradecer a todos os meus amigos.

A todos, o meu muito obrigado.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Contextualização e enquadramento.....	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Software utilizado	2
1.4 - Estrutura do documento.....	2
Capítulo 2	3
Regulação de frequência	3
2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Equação do movimento	4
2.3 - Regulação primária	5
2.4 - Regulação secundária	6
2.5 - Regulação terciária.....	6
Capítulo 3	8
Metodologia desenvolvida	8
3.1 - Introdução.....	8
3.2 - EPSO.....	9
3.3 - Função de avaliação.....	10
3.4 - Valores iniciais da perturbação induzida	11
3.5 - Software desenvolvido e simulações realizadas	13
3.6 - Teste de hipóteses.....	15
Capítulo 4	17

Casos de estudo e análise de resultados.....	17
4.1 - Introdução	17
4.2 - DEGOV	17
4.3 - DEGOV1.....	22
4.4 - GAST	27
4.5 - IEEEG1	32
Capítulo 5	38
Conclusões	38
Referências	39

Lista de Figuras

Figura 2.1- Diagrama geral do controlo de frequência [1]	3
Figura 2.2 - Diagrama da regulação primária de frequência [1].....	5
Figura 2.3 - Diagrama com regulação primária e secundária [2]	6
Figura 3.1 - Modelo TGOV1	8
Figura 3.2 - Movimento de uma partícula num algoritmo EPSO [3]	9
Figura 3.3 - Perturbação induzida	13
Figura 3.4 - Simulação TGOV1/DEGOV	14
Figura 3.5 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV para uma série de 20 simulações	14
Figura 4.1 - Diagrama de blocos do modelo DEGOV	17
Figura 4.2 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/DEGOV	18
Figura 4.3 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV	19
Figura 4.4 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV	20
Figura 4.5 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV	20
Figura 4.6 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV	21
Figura 4.7 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV	21
Figura 4.8 - Diagrama de blocos do modelo DGOV1	22
Figura 4.9 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/DEGOV1	23
Figura 4.10 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV	24
Figura 4.11 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV	25
Figura 4.12 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV1	25
Figura 4.13 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV1	26

Figura 4.14 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV1.....	26
Figura 4.15 - Diagrama de blocos do modelo GAST.....	27
Figura 4.16 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/GAST.....	28
Figura 4.17 - Fitness da simulação TGOV1/GAST.....	29
Figura 4.18 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e GAST.....	30
Figura 4.19 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e GAST.....	30
Figura 4.20 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e GAST.....	31
Figura 4.21 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e GAST.....	31
Figura 4.22 - Diagrama de blocos do modelo IEEEG1.....	32
Figura 4.23 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/IEEEG1.....	33
Figura 4.24 - Fitness da simulação TGOV1/IEEEG1.....	34
Figura 4.25 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e IEEEG1.....	35
Figura 4.26 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e IEEEG1.....	35
Figura 4.27 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e IEEEG1.....	36
Figura 4.28 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e IEEEG1.....	36

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores iniciais dos parâmetros do gerador	11
Tabela 3.2 - Valores iniciais de TGOV1	12
Tabela 3.3 - Limites dos parâmetros de TGOV1	12
Tabela 4.1 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/DEGOV	19
Tabela 4.2 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/DEGOV	24
Tabela 4.3 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/GAST	29
Tabela 4.4 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/IEEEG1	34

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

EPSO	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
ET	Estatística de Teste
INESC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores
MSE	<i>Mean Squared Error</i>

Lista de símbolos

Hz	Hertz
MW	Mega Watt
rad	radiano
s	segundo

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Contextualização e enquadramento

Para o bom funcionamento de um sistema elétrico de energia, é necessário que a frequência seja continuamente constante e o mais próximo possível de 50 Hz, isto é, a carga deve ser o mais próximo possível da geração.

Para que tal aconteça é necessário a existência dos sistemas de regulação de frequência.

Assim, este trabalho pretendeu resolver um problema que usualmente ocorre quando se pretende efetuar a simulação dinâmica de um sistema elétrico real: obter os valores dos parâmetros para um modelo típico do regulador de frequência local de uma máquina síncrona, disponível em ferramentas de simulação dinâmica, quando o modelo fornecido pelos fabricantes não corresponde a nenhum dos modelos típicos.

Pretendeu-se resolver este problema recorrendo ao ajuste do valor dos parâmetros do modelo típico, com o objetivo de minimizar as diferenças da resposta dinâmica fornecida pelos dois modelos (o típico e o fornecido pelo fabricante).

Esta resolução foi efetuada recorrendo à aplicação do método de otimização EPSO (Evolutionary Particle Swarm Optimization) em ambiente Matlab.

A qualidade dos resultados obtidos foi comprovada através da comparação da resposta temporal fornecida, por cada um dos modelos de regulação de frequência (o típico ajustado e o fornecido pelo fabricante), tendo-se recorrido para isso à plataforma de simulação Simulink disponível no Matlab.

1.2 - Objetivos

É objetivo do presente trabalho a construção de um programa, baseado num algoritmo de otimização EPSO, que tenha a capacidade de ajustar os parâmetros do regulador típico TGOV1 de modo a minimizar a diferença entre a resposta dinâmica deste e a resposta dinâmica do regulador do fabricante.

1.3 - Software utilizado

Para a resolução deste problema foi construído um programa baseado num algoritmo de otimização EPSO, tendo sido construído em ambiente Matlab. Recorreu-se também à plataforma Simulink, presente no Matlab, para efetuar as simulações dinâmicas necessárias.

O algoritmo EPSO utilizado foi desenvolvido no INESC Porto, devendo-se no entanto salientar que este mesmo algoritmo não fazia a avaliação das partículas, tendo sido construída a função de avaliação num outro ficheiro.

1.4 - Estrutura do documento

Este documento encontra-se dividido em 5 capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução:** No presente capítulo é apresentada uma visão geral sobre o trabalho efetuado, onde são abordados aspetos como a contextualização e enquadramento, objetivos, software utilizado e a estrutura do documento
- **Capítulo 2 - Reguladores de Frequência:** No capítulo 2 são apresentados todos os conceitos teóricos que definem a regulação de frequência de um sistema elétrico de energia.
- **Capítulo 3 - Metodologia adotada:** No capítulo 3 é explicada a metodologia e estratégia adotada para a resolução do problema proposto, bem como os conceitos teóricos dos algoritmos EPSO e do teste de hipóteses.
- **Capítulo 4 - Casos de estudo e análise de resultados:** No capítulo 4 são explicados os casos de estudo sobre os quais este trabalho incidiu, sendo também discutidos pormenorizadamente os resultados obtidos.
- **Capítulo 5 - Conclusões:** No capítulo 5 são apresentadas as conclusões que foram possíveis obter do trabalho realizado.

Capítulo 2

Regulação de frequência

2.1 - Introdução

A regulação de frequência é vital para o bom funcionamento de um sistema elétrico de energia. Para que tal aconteça é necessário que a frequência se mantenha constante e o mais próximo possível dos 50 Hz.

Existem três tipos de regulação de frequência: regulação primária, secundária e terciária. Este trabalho incide sobre a regulação de frequência primária e secundária.

Na figura seguinte apresenta-se um diagrama geral do controlo de frequência, onde se encontra representado o controlo primário e secundário da regulação de frequência.

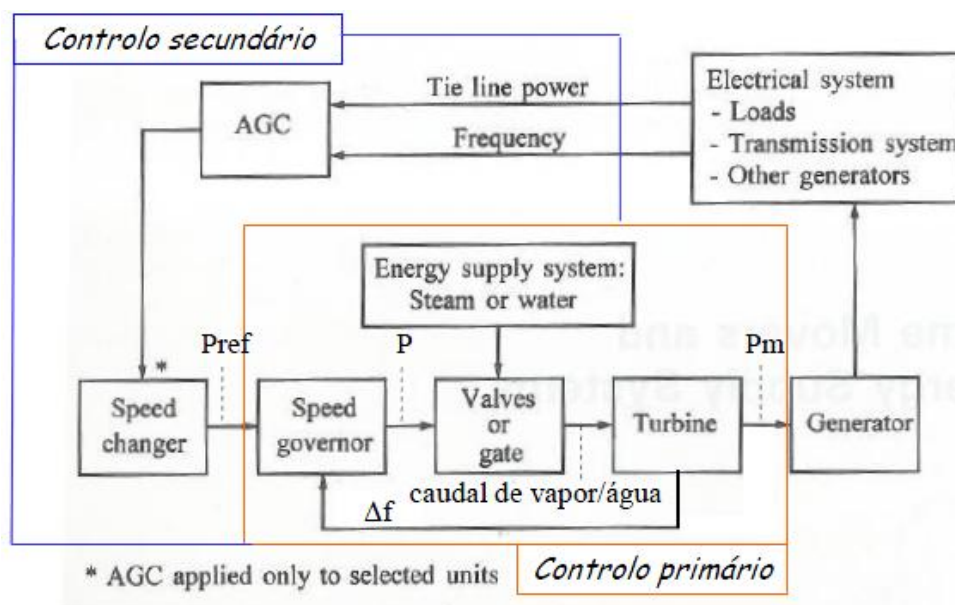


Figura 2.1- Diagrama geral do controlo de frequência [1]

2.2 - Equação do movimento

Em cada gerador, para o sistema estar em equilíbrio, deve ter-se em regime permanente:

$$P_{mec} = P_e \quad (2.1)$$

Onde,

P_{mec} - potência que a máquina primária desenvolve quando acoplado ao gerador

P_e - carga que o gerador alimenta

Segundo [1] a oscilação de uma máquina síncrona pode ser modelizada através das seguintes equações diferenciais de primeira ordem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2H}{\omega_n} \cdot \frac{\partial \Delta\omega(t)}{\partial t} = \bar{P}_m(t) - \bar{P}_e(t) \\ \frac{\partial \delta}{\partial t} = \Delta\omega(t) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \delta}{\partial t} = \Delta\omega(t) \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

onde,

H (s) - constante de inércia da máquina síncrona

ω_n (rad/s) - velocidade angular da máquina síncrona

$\Delta\omega$ (Hz) - desvio de frequência do gerador

$\partial\delta$ (rad elect.) - ângulo de carga

\bar{P}_m (p.u.MW) - potência mecânica

\bar{P}_e (p.u.MW) - potência elétrica

Na modelização da máquina síncrona deve ainda ser tido em conta o fator de amortecimento. O fator de amortecimento pode ser traduzido pela expressão que se apresenta de seguida:

$$\Delta P_d(t) = D \cdot \Delta\omega(t) \quad (2.4)$$

onde,

ΔP_d (MW) - variação do consumo de potência ativa devido à variação de frequência

D (MW/rad/s) - constante de amortecimento da carga

$\Delta\omega$ (rad/s) - desvio de frequência do gerador

Assim, tendo em conta o fator de amortecimento, a oscilação de uma máquina síncrona pode ser modelizada através da expressão que se apresenta de seguida:

$$\frac{2H}{\omega_n} \cdot \frac{\partial \Delta\omega(t)}{\partial t} = \bar{P}m(t) - \bar{P}e(t) - D \cdot \Delta\omega(t) \quad (2.5)$$

2.3 - Regulação primária

O controlo primário de regulação de frequência é um controlo automático e descentralizado, cujo objetivo é estabilizar a frequência, isto é, manter o equilíbrio entre a geração e o consumo.

A regulação primária é assegurada pela malha de retro-ação, na figura seguinte apresenta-se o diagrama de blocos mais simples que se pode associar ao funcionamento da máquina primária e sistema de regulação de frequência.

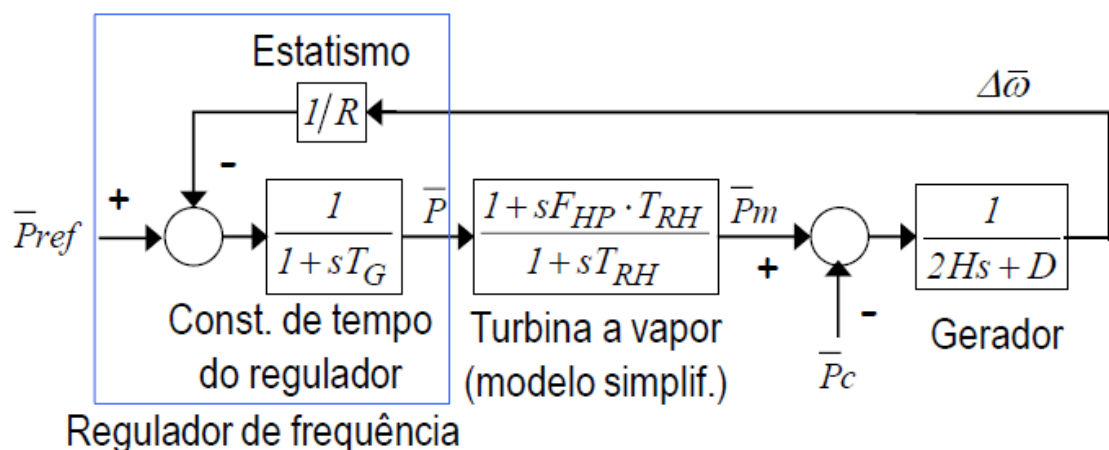


Figura 2.2 - Diagrama da regulação primária de frequência [1]

As grandezas presentes na figura 2.2 são as seguintes:

- R (p.u.Hz/p.u.MW) - Estatismo
- H (s) - constante de inércia da máquina síncrona
- D (p.u.MW/p.u.Hz) - constante de amortecimento
- T_G (s) - constante de tempo do regulador
- T_{RH} (s) - constante de tempo do reaquecimento
- F_{HP} - fração de potência total da turbina que é gerada pelo andar de alta pressão
- \bar{P}_{ref} (p.u.MW) - valor de referência para a potência
- $\bar{P}m$ (p.u.MW) - potência mecânica
- $\bar{P}c$ (p.u.MW) - variação da carga (perturbação)
- \bar{P} - Posição de abertura das válvulas de admissão
- $\Delta\bar{\omega}$ (rad/s) - Erro de frequência em relação a um valor de referência

2.4 - Regulação secundária

Numa rede isolada a regulação de frequência secundária é automática e descentralizada, e tem como objetivo eliminar o desvio de frequência final.

O desvio final de frequência final deve ser eliminado por várias razões, entre elas destacam-se as seguintes:

- Um desvio de frequência final aumenta a fadiga nas unidades geradoras traduzindo-se assim na sua diminuição de vida útil;
- Desvio de frequência final provoca problemas a cargas controladas por processos síncronos, ou dependentes de relógios síncronos.

É portanto necessário um controlo suplementar para eliminar o desvio de frequência final. Este controle atua na referência dos reguladores de velocidade, com o objetivo de corrigir o desvio de frequência que resulta quando apenas o controlo primário atua [2].

A rede estudada durante este trabalho foi uma rede isolada, assim apresenta-se na figura a seguir um diagrama de blocos com regulação secundária de uma rede isolada.

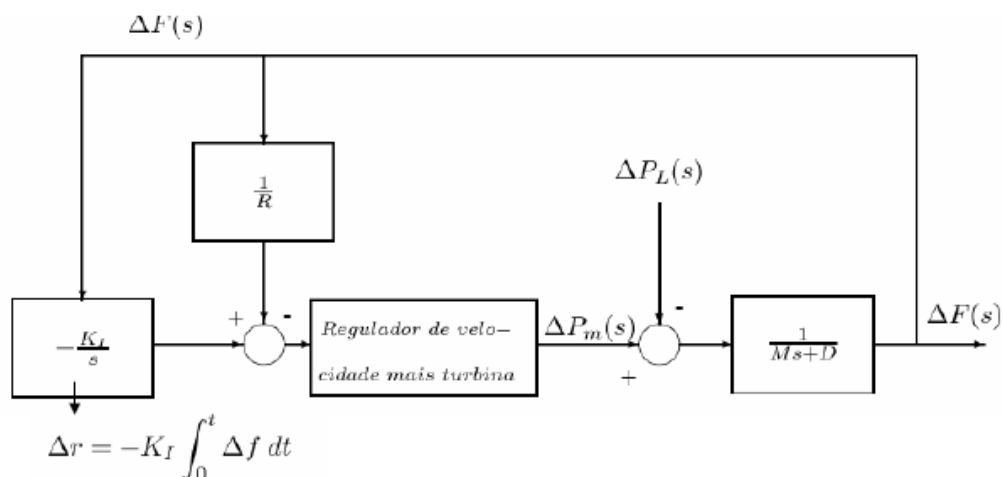


Figura 2.3 - Diagrama com regulação primária e secundária [2]

2.5 - Regulação terciária

A regulação terciária consiste numa série de operações manuais e descentralizadas, entre essas operações destacam-se as seguintes:

- Ligação/desligação de unidades capazes de fornecer reserva em 10/15 minutos (turbinas a gás ou hídricas)
- Re-despacho entre geradores

- Mudança do valor programado para o balanço da troca de potência nas interligações
- Deslastre de carga

O objetivo da regulação terciária é restabelecer o valor de reserva secundária da área de controlo. [1]

Capítulo 3

Metodologia desenvolvida

3.1 - Introdução

Foi objetivo do trabalho desenvolvido conceber um programa que ajuste os parâmetros do modelo típico TGOV1 de modo a que a diferença de resposta dinâmica deste, quando comparada com o modelo do fabricante, seja minimizada.

Optou-se pelo modelo TGOV1 uma vez que este modelo é o modelo mais simples que se pode associar ao funcionamento de uma máquina primária e sistema de regulação de frequência.

De seguida apresenta-se o modelo TGOV1 que foi implementado no Simulink do Matlab.

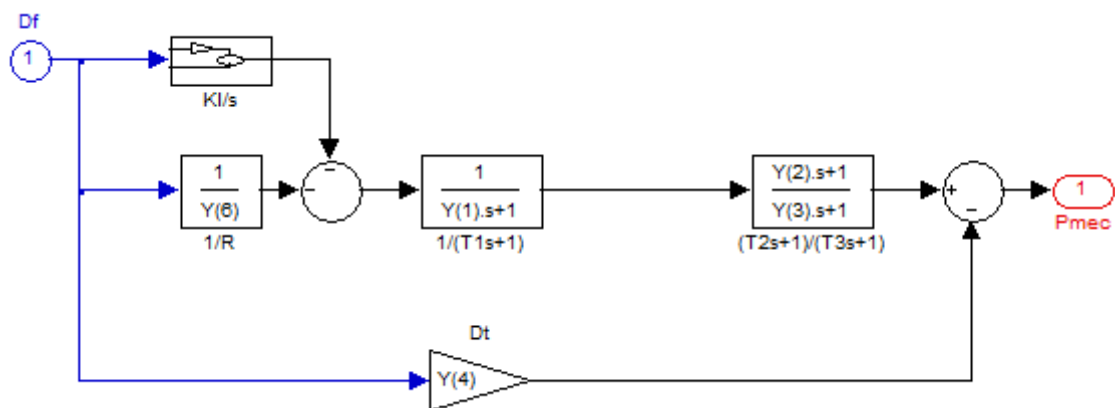


Figura 3.1 - Modelo TGOV1

Em Os parâmetros de TGOV1 que o programa desenvolvido ajusta são os seguintes:

- T1 (s) - Constante de tempo do regulador
- T2/T3 - Fração de potência desenvolvida pela turbina de alta pressão
- T3 (s) - Constante de tempo de reaquecimento

- Dt (p.u.MW/p.u.Hz) - Fator de amortecimento da turbina
- KI (p.u.MW/p.u.Hz) - Ganho integral
- R (p.u.Hz/p.u.MW) - Estatismo

O programa desenvolvido é baseado num algoritmo de otimização EPSO, cujos conceitos teóricos se apresentam de seguida.

3.2 - EPSO

O algoritmo de otimização EPSO, tal como o PSO, deriva da observação do comportamento de enxames. O EPSO distingue-se do PSO essencialmente por os seus pesos serem variáveis, isto é, são auto adaptativos.

O esquema geral de um algoritmo EPSO é o seguinte:

- Replicação - cada partícula é replicada r-1 vezes
- Mutação - cada clone sofre mutação nos seus parâmetros estratégicos W
- Reprodução - cada partícula gera 1 descendente de acordo com a equação do movimento
- Avaliação - cada descendente é avaliado
- Seleção - por torneio estocástico a melhor partícula de cada grupo de r descendentes de cada individuo da geração anterior é selecionada para formar uma nova geração [3]

O vetor do movimento de uma partícula pode ser decomposto em três vetores distintos: inércia, memória e cooperação. De seguida é apresentada uma figura que exemplifica o movimento de uma partícula.

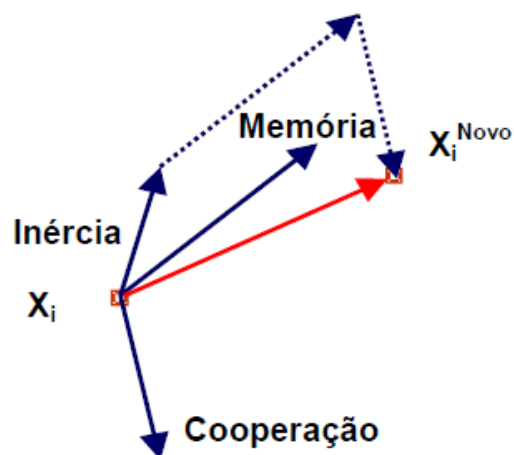


Figura 3.2 - Movimento de uma partícula num algoritmo EPSO [3]

São de seguida apresentadas as fórmulas que regem o movimento de uma partícula do algoritmo EPSO.

$$X_i^{novo} = X_i + V_i^{novo} \quad (3.1)$$

$$V_i^{novo} = W_i V_i + W m_i (b_i - X_i) + W c_i (b_G - X_i) \quad (3.2)$$

onde,

X_i^{novo} - Nova posição da partícula;

X_i - Posição da partícula;

V_i^{novo} - Velocidade da partícula;

W_i - Peso associado à inércia da partícula;

$W m_i$ - Peso associado à memória de cada partícula;

$W c_i$ - Peso associado à cooperação entre partículas;

b_i - melhor solução encontrada na história da vida da partícula;

b_G - melhor solução encontrada pelo enxame até ao momento;

Os pesos da fórmula do movimento vão sendo alterados ao longo da execução do algoritmo, isto é, são auto adaptativos. O esquema básico para qualquer peso W é definido pela expressão que se apresenta de seguida.

$$\tilde{W}_{ik} = W_{ik} [\text{LogN}(0,1)]^\tau \quad (3.3)$$

onde,

$\text{LogN}(0,1)$ - é uma variável aleatória com distribuição Lognormal derivada da distribuição Gaussiana $N(0,1)$ de média 0 e variância 1;

τ - é um parâmetro de aprendizagem, fixado externamente, que controla a amplitude das mutações - valores mais pequenos conduzem a maior probabilidade de valores próximos de 1;

3.3 - Função de avaliação

No presente trabalho definiu-se que a fitness, cujo objetivo é a sua minimização, seria calculado através do Erro Quadrático Médio, cuja função se apresenta de seguida.

$$MSE = \frac{1}{ne} \sum_{i=1}^{ne} (y_i - \hat{y}_i(f))^2 \quad (3.4)$$

Onde,

ne - Número de exemplos da amostra

y_i - Valor especificado

\hat{y}_i - Valor previsto

Optou-se pelo Erro Quadrático Médio uma vez que é uma função com a qual já se estava familiarizado e também porque é uma função usualmente usada na resolução do tipo de problema presente neste trabalho.

De referir que no caso em estudo a função do fitness foi aplicada sobre a resposta dinâmica do desvio de frequência, isto é, considerou-se que o valor especificado era o desvio de frequência do modelo TGOV1 inicial, enquanto o valor previsto era o desvio de frequência do modelo do fabricante em estudo.

O número da amostra foi variável uma vez que foi utilizado um passo variável nas simulações do Simulink. O passo embora variável andava tipicamente em torno dos 0,25 segundos, tendo em conta que as simulações realizadas foram de 50 segundos, tem-se assim um número de exemplos da amostra de cerca de 200.

3.4 - Valores iniciais da perturbação induzida

Na tabela seguinte apresentam-se os parâmetros do gerador utilizado nas simulações efetuadas.

Tabela 3.1 - Valores iniciais dos parâmetros do gerador

Gerador	
S_n (MVA)	5
H (s)	3
D (p.u.MW/p.u.Hz)	0,5

Todos os parâmetros foram introduzido na simulação na base do sistema, sendo que se considerou a base do sistema como $S_b = 5$ MVA. Visto a base do sistema ser igual à base da máquina os valores mantiveram-se inalteráveis.

Na simulação inicial dos parâmetros do modelo TGOV1 foram utilizados valores típicos do modelo, exceto no parâmetro T1. A simulação apresentou problemas de estabilidade, traduzindo-se em resultados errados quando os parâmetros T1 e T3 eram quatro vezes inferior ao passo da simulação. O passo da simulação utilizado foi um passo variável, no entanto era aproximadamente 0,25 segundos. Visto que o valor inicial de T3 já era quatro vezes superior

ao passo foi apenas necessário corrigir o valor inicial de T1, assim definiu-se que o valor inicial de T1 era de 1 segundo.

Os valores iniciais dos parâmetros de TGOV 1 utilizados em todas as simulações foram os que se apresentam na tabela seguinte:

Tabela 3.2 - Valores iniciais de TGOV1

TGOV1 inicial	
T1 (s)	1
T2 (s)	1,8
T3 (s)	6
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	1
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,05

Na execução do programa tem que se definir os limites mínimos e máximos das variáveis de TGOV1 que vão ser ajustados. Apresentam-se na tabela seguinte os limites definidos para cada parâmetro. De notar que os limites mínimos de T1 e T3 foram bastante elevados, no entanto como já foi referido o programa apresentava resultados errados quando estes valores eram quatro vezes inferior ao passo utilizado nas simulações. Assim, definiu-se que o limite mínimo de T1 e T3 seria de 1 segundo.

Tabela 3.3 - Limites dos parâmetros de TGOV1

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
T1 (s)	1	20
T2 (s)	0,0001	20
T3 (s)	1	20
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0	20
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	0	50
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,0001	1

Para se poder proceder à resposta dinâmica dos reguladores de frequência em estudo foi necessário induzir uma perturbação no sistema em estudo, a perturbação simulada consistiu num aumento de carga de 1,5 MW ao segundo 1.

De seguida apresenta-se a figura da perturbação simulada nos estudos efetuados.

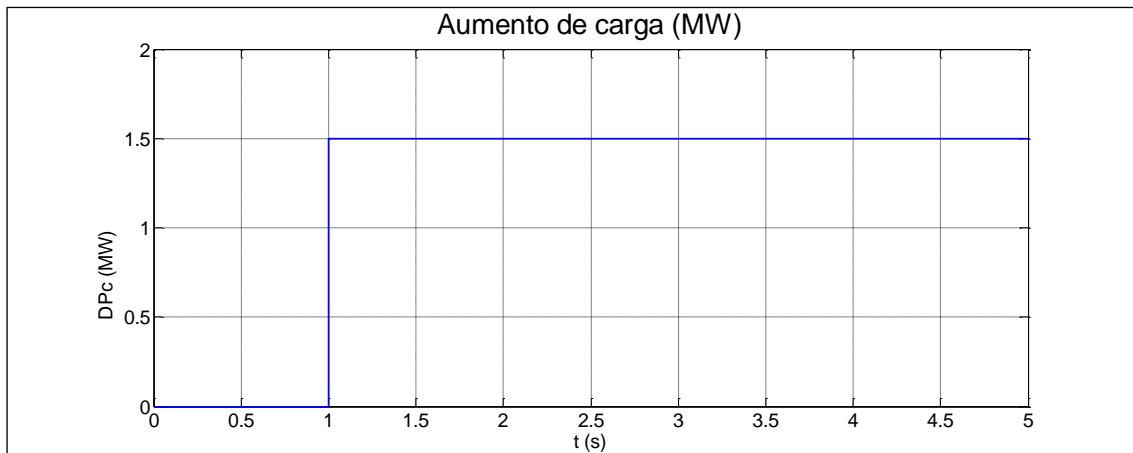


Figura 3.3 - Perturbação induzida

3.5 - Software desenvolvido e simulações realizadas

O programa desenvolvido resultou na construção de quatro ficheiros distintos. Sendo assim, o programa desenvolvido é composto pelos seguintes ficheiros:

- Ficheiro executável: programa.m
- Algoritmo EPSO (exceto avaliação): epso_matrix.m
- Função de Avaliação: f_evaluation
- Ficheiros Simulink: DEGOV.mdl, DEGOV1.mdl, GAST.mdl e IEEEG1.mdl

Foram analisados quatro casos de estudos, cujos resultados são analisados em pormenor no capítulo 4. Na imagem seguinte mostra-se uma figura de uma das simulações realizadas, sendo que o exemplo apresentado corresponde à simulação TGOV1/DEGOV.

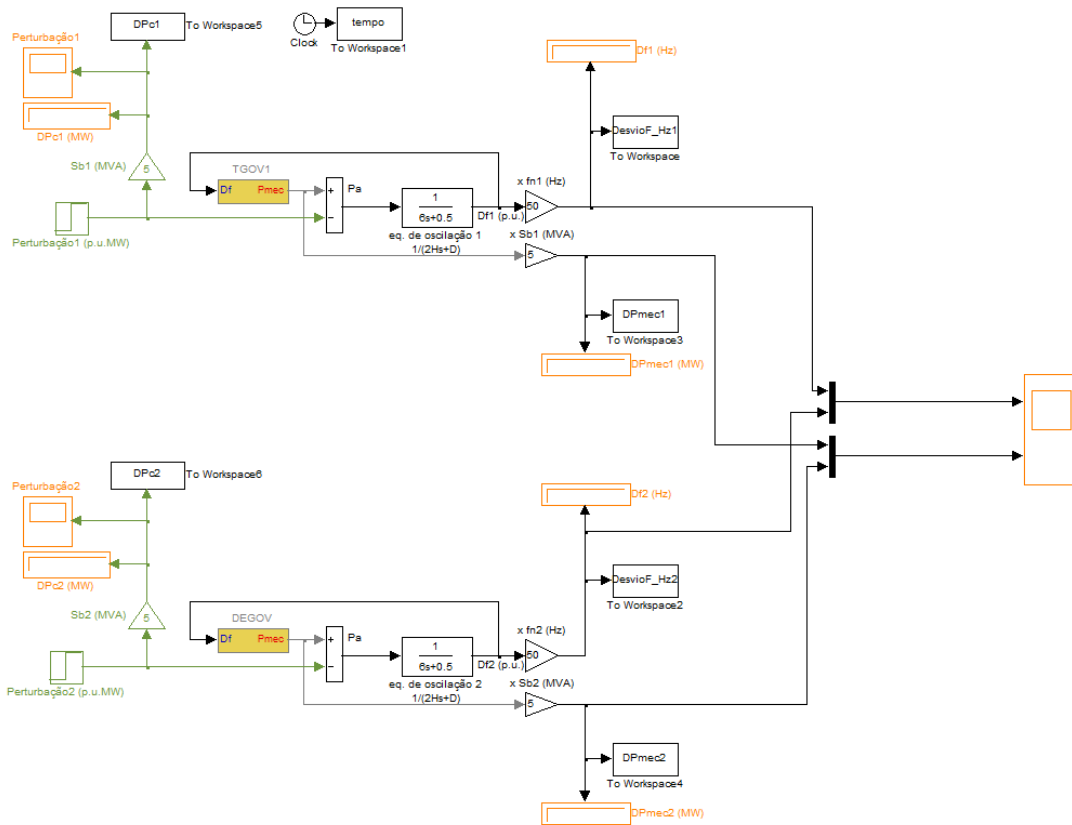


Figura 3.4 - Simulação TGOV1/DEGOV

Inicialmente começou por se realizar para cada um dos casos de estudo uma série de 20 simulações, sendo que cada uma das simulações foi realizada com 10 partículas e 10 iterações. Deve-se entender como iteração a execução de um ciclo completo do algoritmo de otimização EPSO.

Na figura a seguir apresenta-se, a título de exemplo, o valor da função fitness obtido para uma série de 20 simulações nos modelos TGOV1/DEGOV.

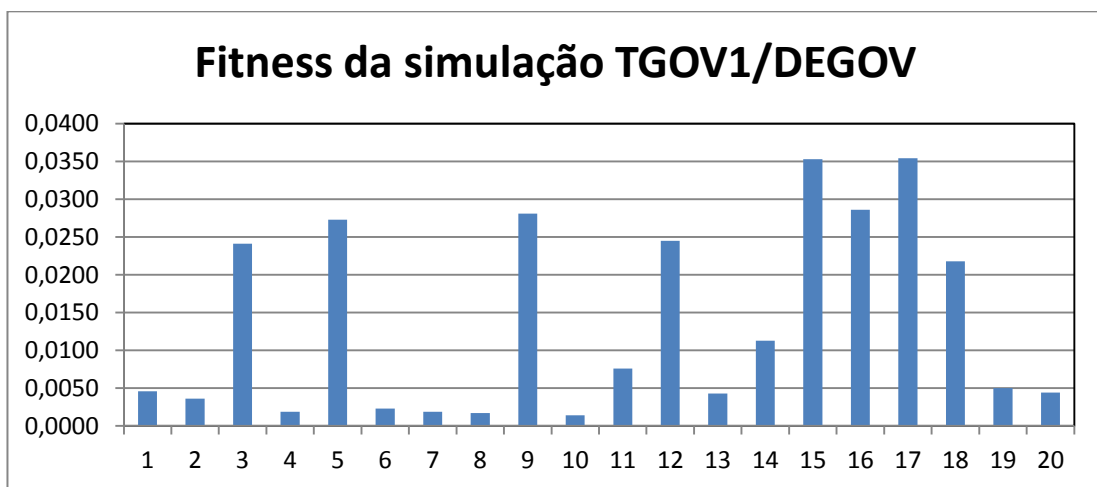


Figura 3.5 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV para uma série de 20 simulações

Tal como se pode verificar através da análise da figura 3.5, obtiveram-se resultados muito diferentes para cada uma das simulações, tendo-se assinalado também o mesmo tipo de diferenças nos outros casos de estudo.

Em consequência dos resultados obtidos, foi decido realizar o estudo de várias alternativas diferentes para se saber qual delas obtinha melhor desempenho de ajuste, sendo que o desempenho foi posteriormente avaliado através do teste de hipóteses. As alternativas em estudo foram:

- Alternativa 1 - série de 20 simulações com 10 iterações e 10 partículas
- Alternativa 2 - série de 20 simulações com 10 iterações e 20 partículas
- Alternativa 3 - série de 20 simulações com 20 iterações e 10 partículas
- Alternativa 4 - série de 20 simulações com 100 iterações e 100 partículas

Depois de análise efetuada através do teste de hipóteses às várias alternativas, foi também analisada em pormenor para cada um dos modelos em estudo a simulação que apresenta o menor valor de fitness, encontrando-se esse estudo no capítulo 4 do presente trabalho.

De referir que uma simulação da alternativa 1, 2 e 3 demora menos de um minuto a executar o programa, enquanto uma simulação da alternativa 4 demora aproximadamente 15 minutos.

3.6 - Teste de hipóteses

Supondo os valores esperados de duas populações desconhecidas cujos erros de desempenho se designam $\mu_{E,A}$ e $\mu_{E,B}$ é testada a seguinte hipótese nula:

$$H_0: \mu_{E,A} = \mu_{E,B} \quad (3.5)$$

a qual considera que as duas alternativas fornecem erros de desempenho semelhantes. Se for possível supor, com uma elevada probabilidade, que H_0 é falsa, então considera-se válida a segunda hipótese alternativa:

$$H_1: \mu_{E,A} > \mu_{E,B} \quad (3.6)$$

a qual considera que, de entre as duas alternativas, a A fornece pior desempenho. Esta inferência é realizada através do cálculo da seguinte estatística de teste:

$$ET = \frac{\bar{E}_A - \bar{E}_B}{\sqrt{\frac{S_{\bar{E},A}^2}{N_A} + \frac{S_{\bar{E},B}^2}{N_B}}} \quad (3.7)$$

onde,

\bar{E}_A - Média amostral da alternativa A;

\bar{E}_B - Média amostral da alternativa B;

$S_{\bar{E},A}^2$ - Variância amostral da alternativa A;

$S_{\bar{E},B}^2$ - Variância amostral da alternativa B

N_A - Dimensão da amostra da alternativa A;

N_B - Dimensão da amostra da alternativa B;

Admitindo que H_0 é verdadeira, então ET segue uma distribuição Normal Padronizada, ou seja, uma distribuição do tipo $N(0,1)$. Partindo deste pressuposto, será então possível obter, por consulta dos valores da distribuição $N(0,1)$, um valor crítico para ET, denominado $ET(\alpha)$, como sendo o valor para o qual a variável ET tem uma probabilidade α de ter um valor superior a $ET(\alpha)$. Se o valor calculado para ET através da equação (3.7) for maior que $ET(\alpha)$, então H_0 é rejeitada com um nível de confiança de $(1-\alpha) \times 100\%$.

Neste processo, α denomina-se nível de significância do teste. Ao maior valor de α com o qual se pode rejeitar H_0 dá-se o nome de valor de prova. Quanto menor for o valor de prova, mais forte será a confiança $(1-\alpha) \times 100\%$ com que se pode aceitar H_1 por consequência de se ter rejeitado H_0 . Neste tipo de teste é costume aceitar-se H_1 , se o valor de prova for, no máximo, de 5% (nível de confiança mínimo de 95%). Para maiores valores de prova, a hipótese H_0 não é geralmente rejeitada, considerando-se que o teste é inconclusivo. [4]

Capítulo 4

Casos de estudo e análise de resultados

4.1 - Introdução

No decorrer deste trabalho foram analisados quatro casos de estudo, tendo sido analisados os modelos DEGOV, DEGOV1, GAST e IEEE1.

Nestes capítulos são apresentados detalhadamente os resultados obtidos em cada um dos modelos.

4.2 - DEGOV

Na figura a seguir é apresentado o modelo DEGOV que foi implementado em Matlab.

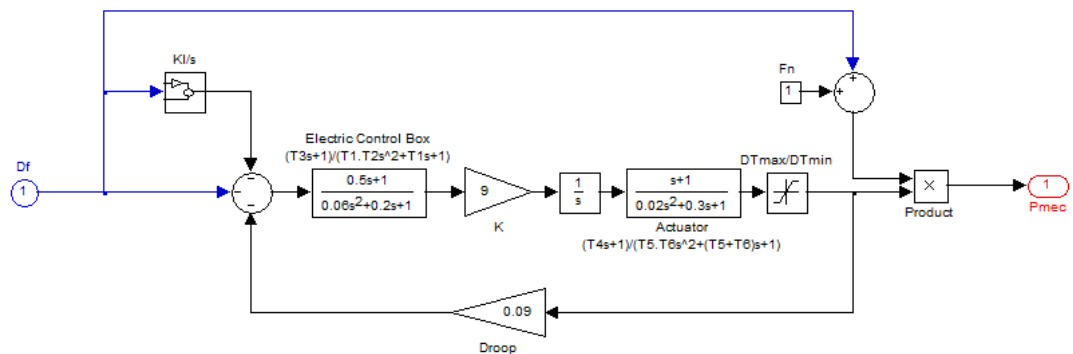


Figura 4.1 - Diagrama de blocos do modelo DEGOV

Os valores dos parâmetros do modelo DEGOV utilizados na simulação foram os seguintes:

- T1 (s): 0,2
- T2 (s): 0,3
- T3 (s): 0,5
- T4 (s): 1
- T5 (s): 0,1
- T6 (s): 0,2
- KI (p.u.MW/p.u.Hz): 0,5
- DROOP (p.u.Hz /p.u.MW): 9
- K (p.u.MW/p.u.Hz): 0,09
- DTmax (MW): 1,2
- DTmin (MW): -0,05

Após o modelo DEGOV ter sido modelizado, foram efetuadas as simulações correspondentes às diferentes alternativas em estudo.

Depois de realizadas as várias simulações recorreu-se ao Teste de Hipóteses para verificar qual das alternativas apresentava melhor desempenho de ajuste. O estudo efetuado através do teste de hipóteses encontra-se resumido na figura a seguir apresentada.

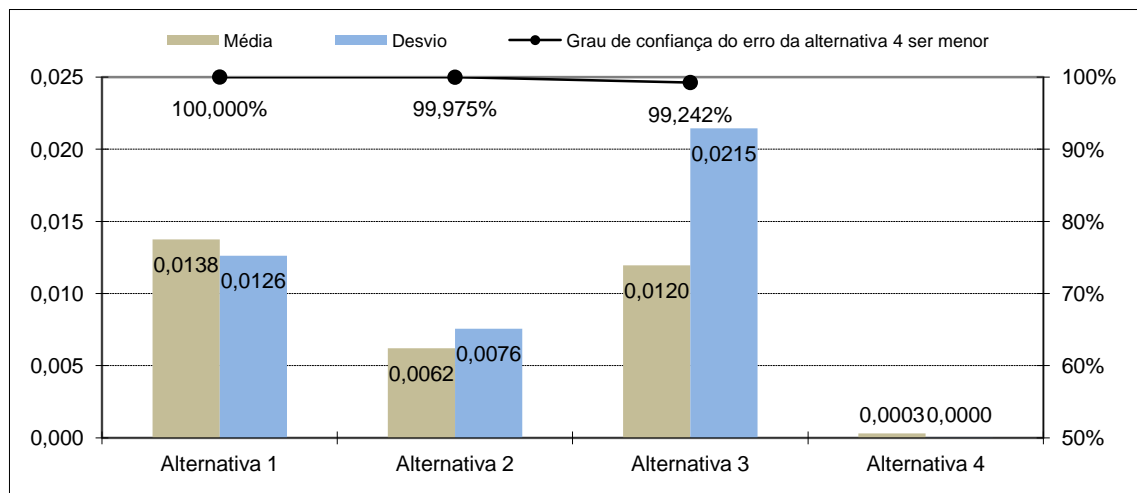


Figura 4.2 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/DEGOV

No teste de hipóteses estudou-se a hipótese do erro da alternativa com 100 iterações e 100 partículas ter um melhor desempenho de ajuste, quando comparado com cada uma das outras alternativas. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que o nível de confiança com que se pode aceitar que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas tem melhor desempenho de ajuste, que qualquer uma das outras das hipóteses, é sempre superior a 95%.

Sendo assim, pode-se concluir que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas é a alternativa com melhor desempenho de ajuste.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos na simulação com menor valor fitness, de realçar que a simulação com menor valor de fitness foi obtida na série de simulações com 100 partículas e 100 iterações.

Após ter sido executado o programa desenvolvido foram obtidos novos valores para os parâmetros do modelo TGOV1, na tabela a seguir apresentada encontram-se os parâmetros iniciais do modelo TGOV1 bem como os parâmetros obtidos após a execução do programa.

Tabela 4.1 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/DEGOV

TGOV1 inicial		➔	TGOV1 ajustado	
T1 (s)	1		T1 (s)	2,2291
T2 (s)	1,8		T2 (s)	1,7152
T3 (s)	6		T3 (s)	1,0000
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0		Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	4,6614
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	1		KI (p.u.MW/p.u.Hz)	5,6695
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,05		R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,1299

Verifica-se que após a execução do programa todos os parâmetros foram alterados, de seguida apresenta-se a evolução da fitness ao longo da simulação.

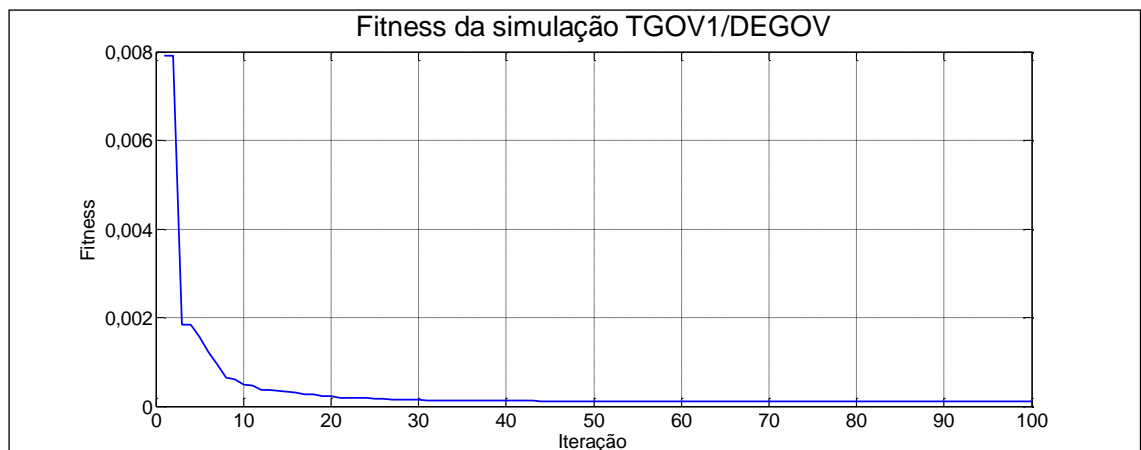


Figura 4.3 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV

Da análise da figura 4.3 verifica-se que, tal como seria desejável, o valor da fitness final é consideravelmente menor que o inicial. De notar também que a curva é uma curva típica de um algoritmo EPSO, tal como seria de esperar.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 inicial com o do modelo DEGOV, bem como a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo DEGOV.

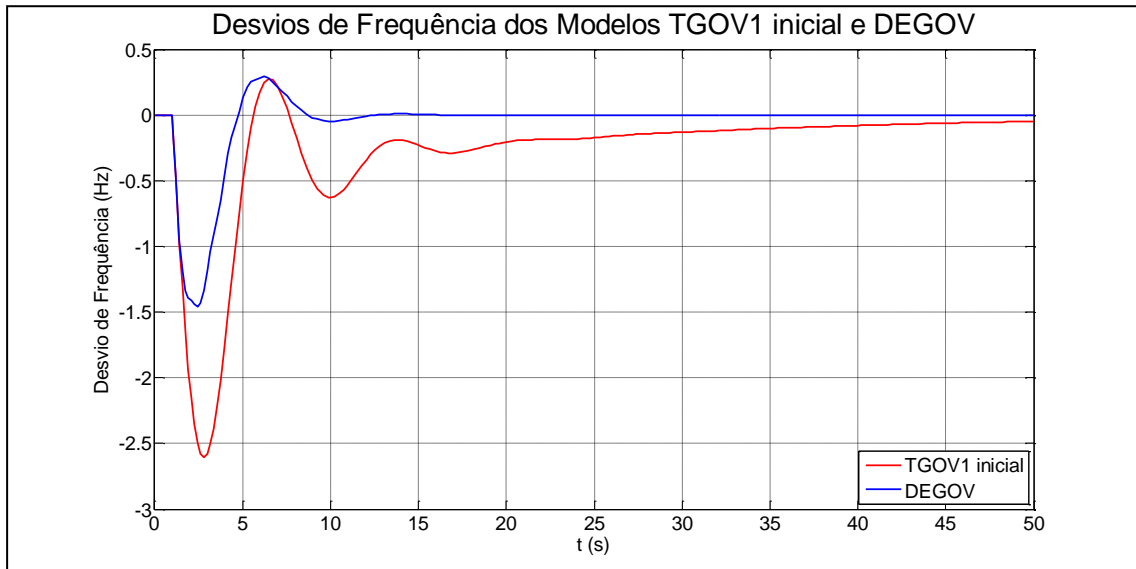


Figura 4.4 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV

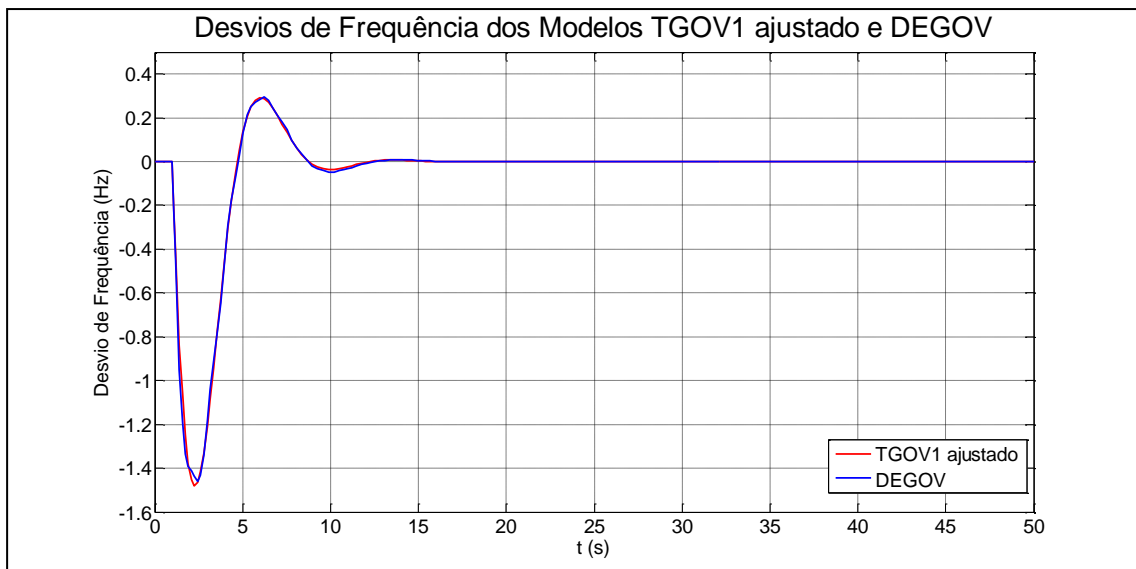


Figura 4.5 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV

Da análise dos figura 4.4, verifica-se que inicialmente o desvio de frequência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo DEGOV.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de frequência muito mais próximo do modelo DEGOV tal como se pode verificar na figura 4.5.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de potência mecânica TGOV1 inicial com o do modelo DEGOV, bem como a comparação do desvio de potência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo DEGOV.

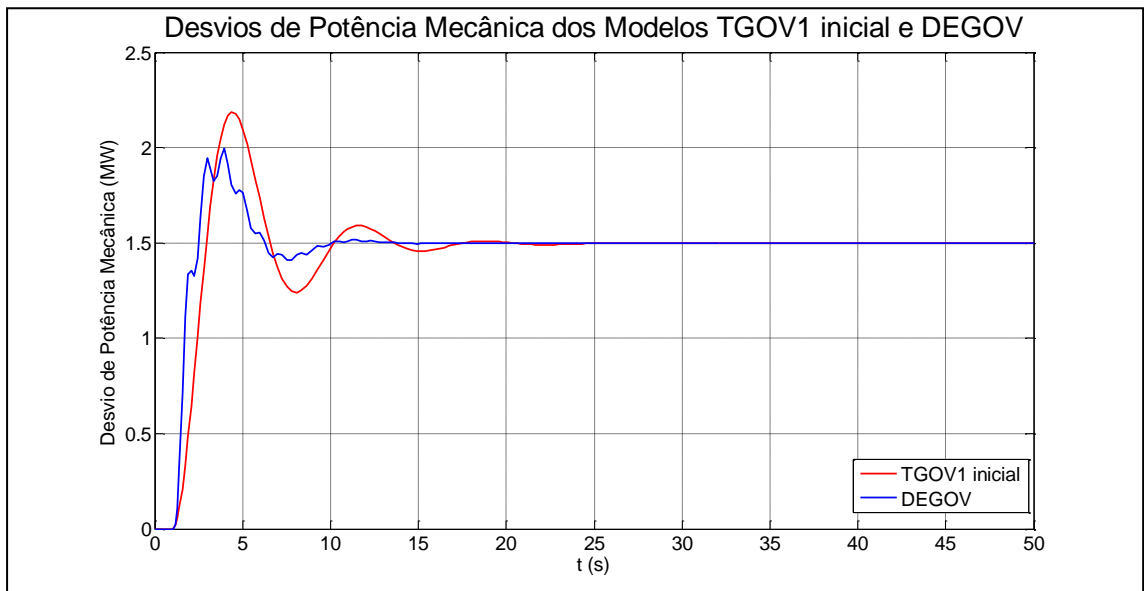


Figura 4.6 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV

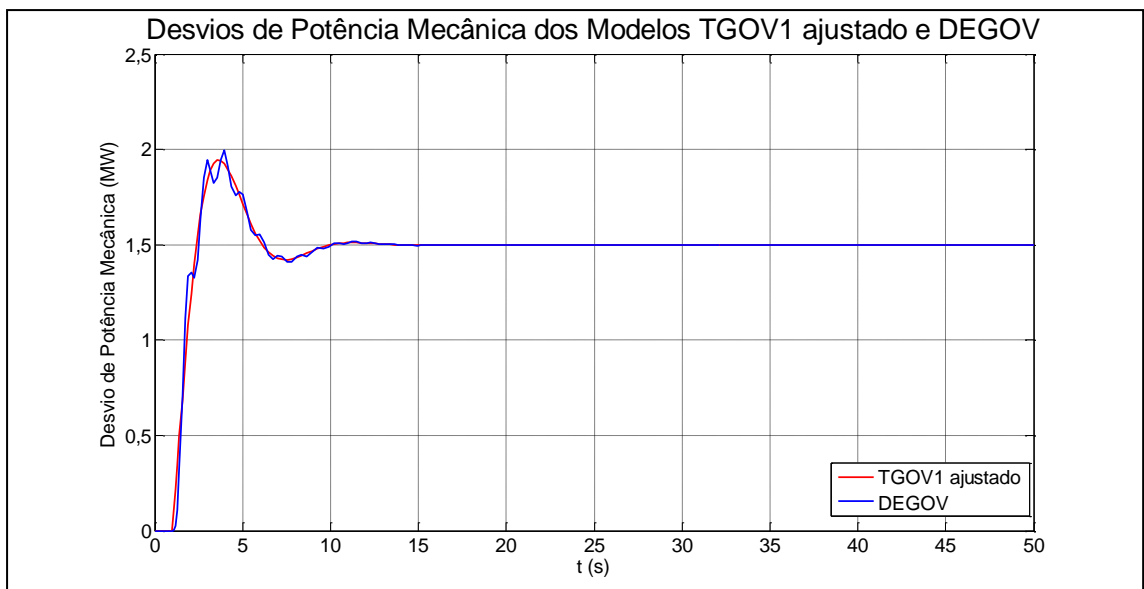


Figura 4.7 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV

Da análise da figura 4.6, verifica-se que inicialmente o desvio de potência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo DEGOV.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de potência muito mais próximo do modelo DEGOV tal como se pode verificar na figura 4.7.

Em conclusão, pode-se afirmar que a aplicação do algoritmo desenvolvido foi bastante eficaz para a diminuição das diferenças de resposta dinâmica entre o modelo TGOV1 ajustado e o modelo DEGOV.

4.3 - DEGOV1

Na figura a seguir é apresentado o modelo DEGOV1 que foi implementado em Matlab.

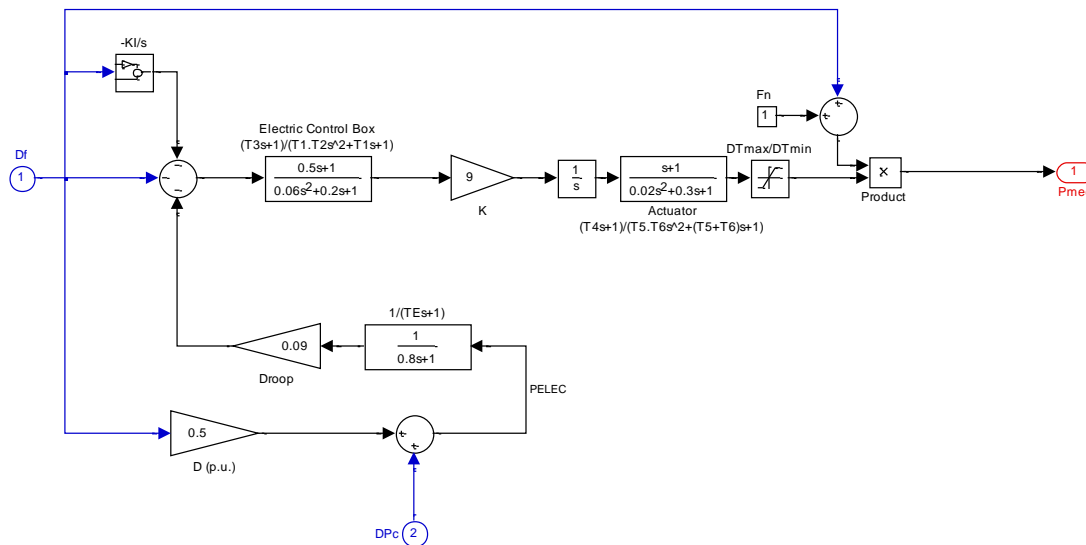


Figura 4.8 - Diagrama de blocos do modelo DEGOV1

Os valores dos parâmetros do modelo DEGOV1 utilizados na simulação foram os seguintes:

- T1 (s): 0,2
- T2 (s): 0,3
- T3 (s): 0,5
- T4 (s): 1
- T5 (s): 0,1
- T6 (s): 0,2
- TE (s): 0,8
- Kl (p.u.MW/p.u.Hz): 0,5
- DROOP (p.u.Hz /p.u.MW): 9
- K (p.u.MW/p.u.Hz): 0,09

- DTmax (MW): 1,2
- DTmin (MW): -0,05
- D (p.u.MW/p.u.Hz): 0,5

Após o modelo DEGOV1 ter sido modelizado, foram efetuadas as simulações correspondentes às diferentes alternativas em estudo.

Depois de realizadas as várias simulações recorreu-se ao Teste de Hipóteses para verificar qual das alternativas apresentava melhor desempenho de ajuste. O estudo efetuado através do teste de hipóteses encontra-se resumido na figura a seguir apresentada.

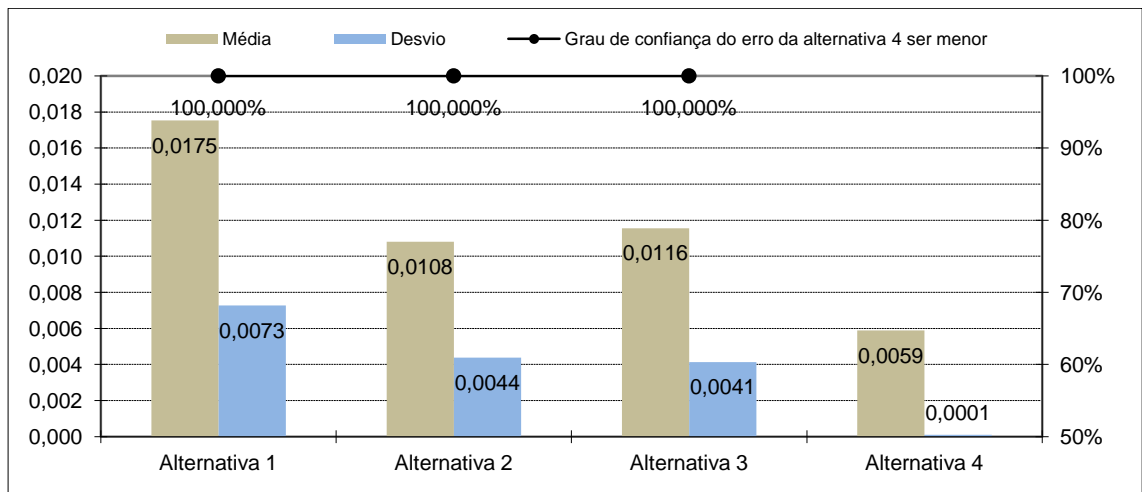


Figura 4.9 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/DEGOV1

No teste de hipóteses estudou-se a hipótese do erro da alternativa com 100 iterações e 100 partículas ter um melhor desempenho de ajuste, quando comparado com cada uma das outras alternativas. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que o nível de confiança com que se pode aceitar que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas tem melhor desempenho de ajuste, que qualquer uma das outras das hipóteses, é sempre superior a 95%. Sendo assim, pode-se concluir que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas é a alternativa com melhor desempenho de ajuste.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos na simulação com menor valor de fitness, de realçar que a simulação com menor valor de fitness foi obtida na série de simulações com 100 partículas e 100 iterações.

Após ter sido executado o programa desenvolvido foram obtidos novos valores para os parâmetros do modelo TGOV1, na tabela a seguir apresentada encontram-se os parâmetros iniciais do modelo TGOV1 bem como os parâmetros obtidos após a execução do programa.

Tabela 4.2 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/DEGOV

TGOV1 inicial		→	TGOV1 ajustado	
T1 (s)	1		T1 (s)	1,5968
T2 (s)	1,8		T2 (s)	1,0000
T3 (s)	6		T3 (s)	1,5968
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0		Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	2,6380
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	1		KI (p.u.MW/p.u.Hz)	5,6661
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,05		R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,1105

Verifica-se que após a execução do programa todos os parâmetros foram alterados, de seguida apresenta-se a evolução do fitness ao longo da simulação.

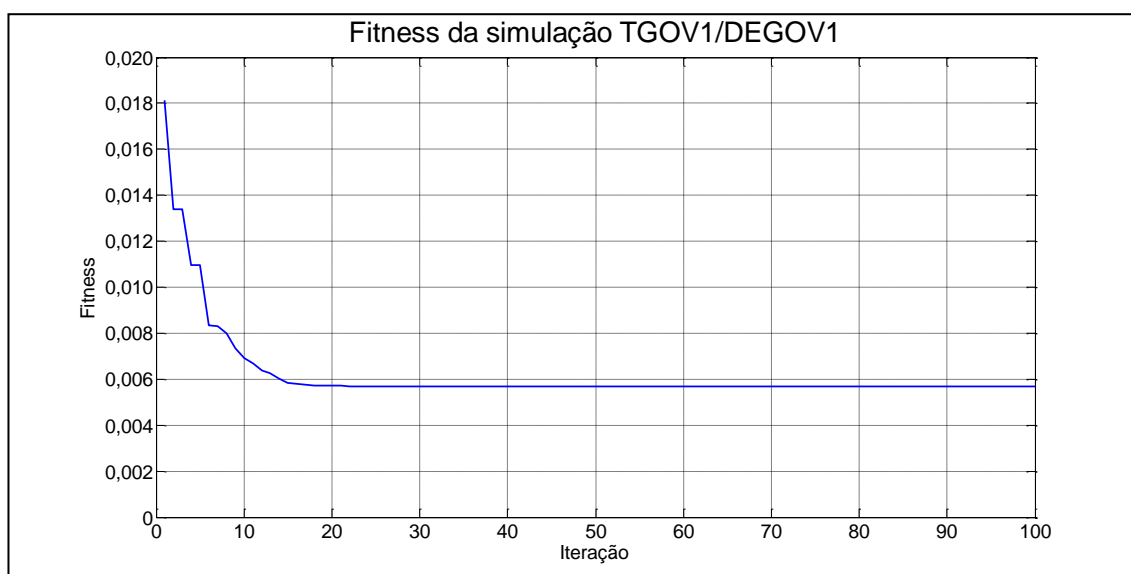


Figura 4.10 - Fitness da simulação TGOV1/DEGOV

Da análise da figura 4.10 verifica-se que, tal como seria desejável, o valor da fitness final é consideravelmente menor que o inicial. De notar também que a curva é uma curva típica de um algoritmo EPSO, tal como seria de esperar.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 inicial com o do modelo DEGOV1, bem como a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo DEGOV1.

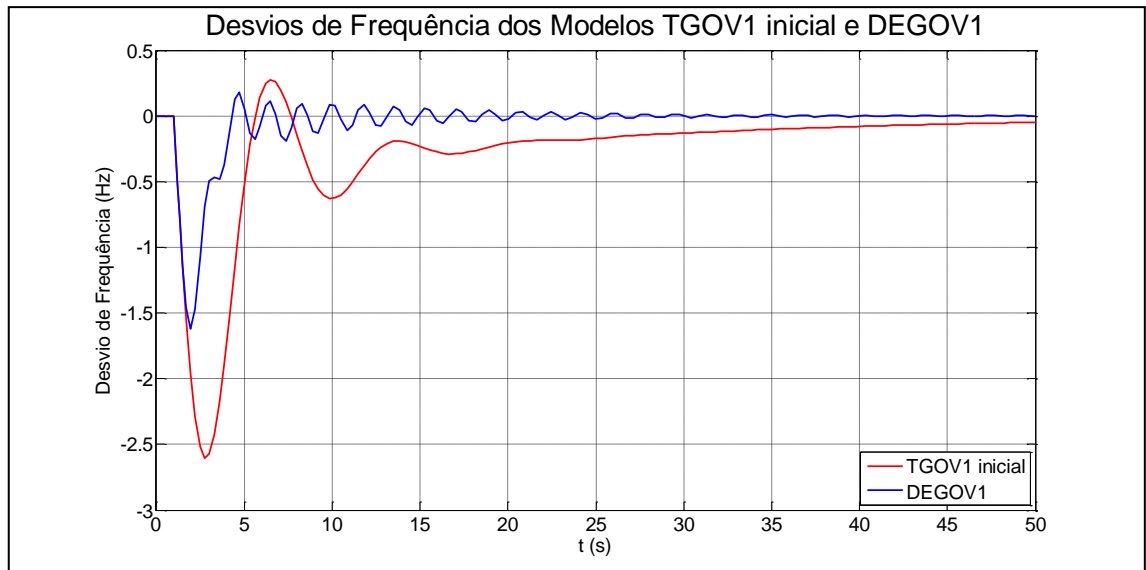


Figura 4.11 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV

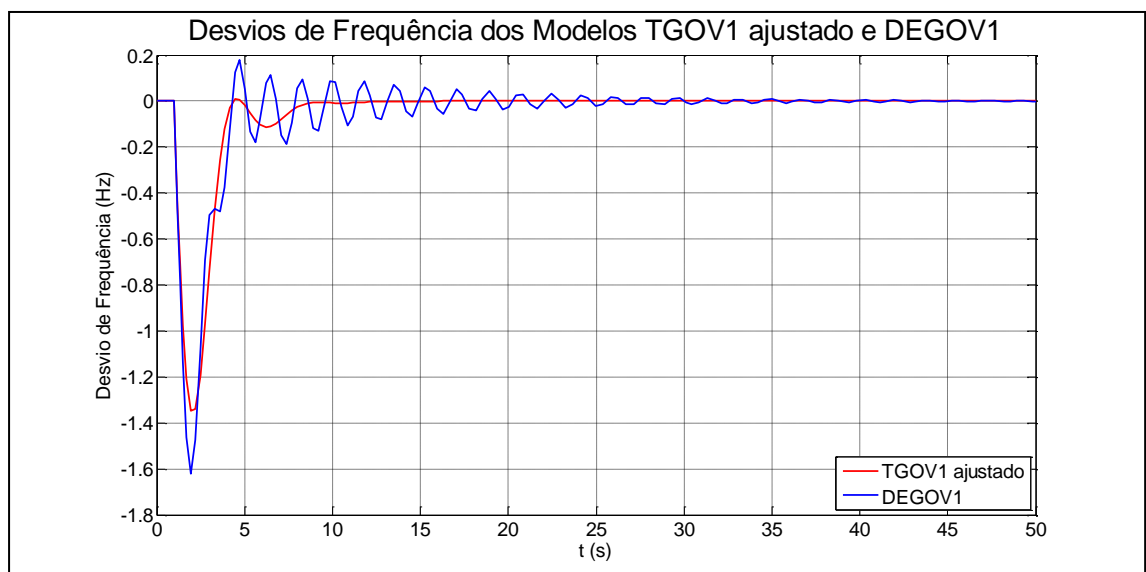


Figura 4.12 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV1

Da análise dos figura 4.11, verifica-se que inicialmente o desvio de frequência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo DEGOV1.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de frequência muito mais próximo do modelo DEGOV1 tal como se pode verificar na figura 4.12.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de potência mecânica TGOV1 inicial com o do modelo DEGOV1, bem como a comparação do desvio de potência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo DEGOV1.

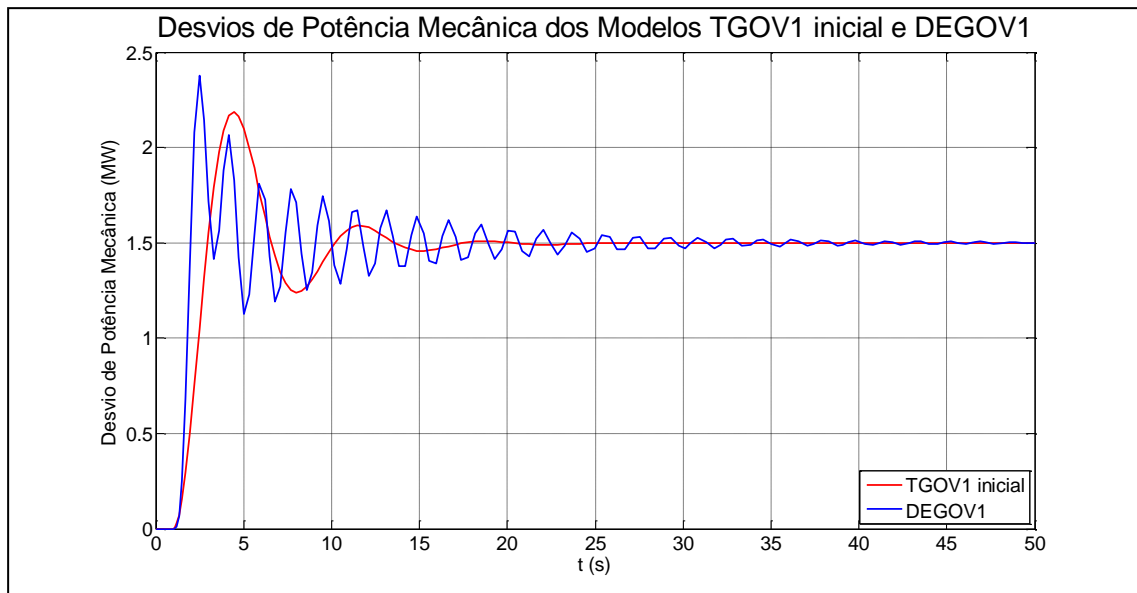


Figura 4.13 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e DEGOV1

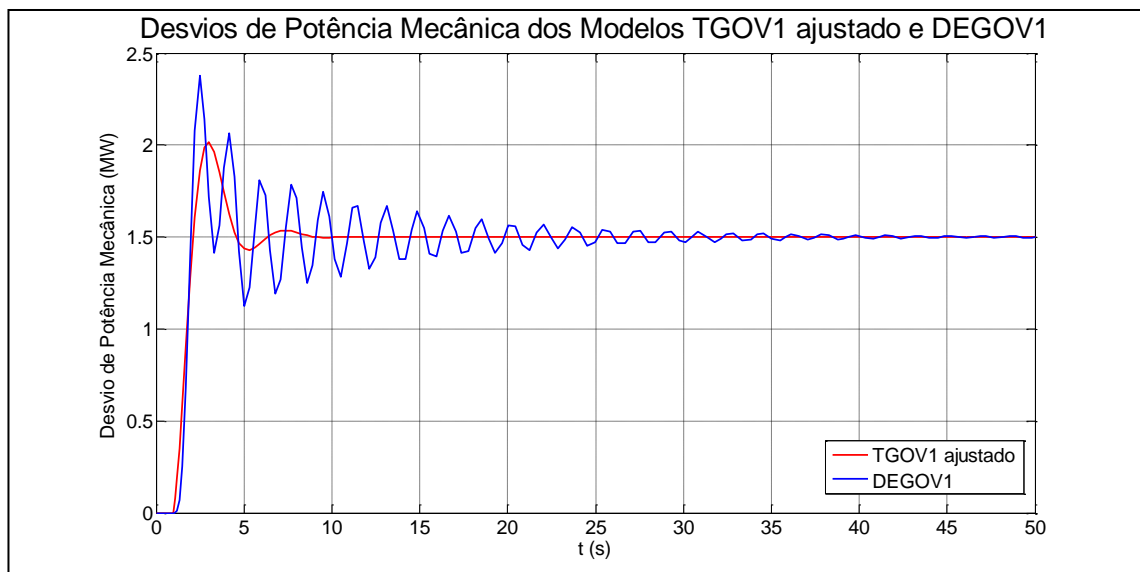


Figura 4.14 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e DEGOV1

Da análise da figura 4.13, verifica-se que inicialmente o desvio de potência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo DEGOV1.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de potência ligeiramente mais próximo do modelo DEGOV1 tal como se pode verificar na figura 4.14.

Em conclusão, pode-se afirmar que a aplicação do algoritmo desenvolvido foi bastante eficaz para a diminuição das diferenças de resposta dinâmica entre o modelo TGOV1 ajustado e o modelo DEGOV1.

4.4 - GAST

Na figura a seguir é apresentado o modelo GAST que foi implementado em Matlab.

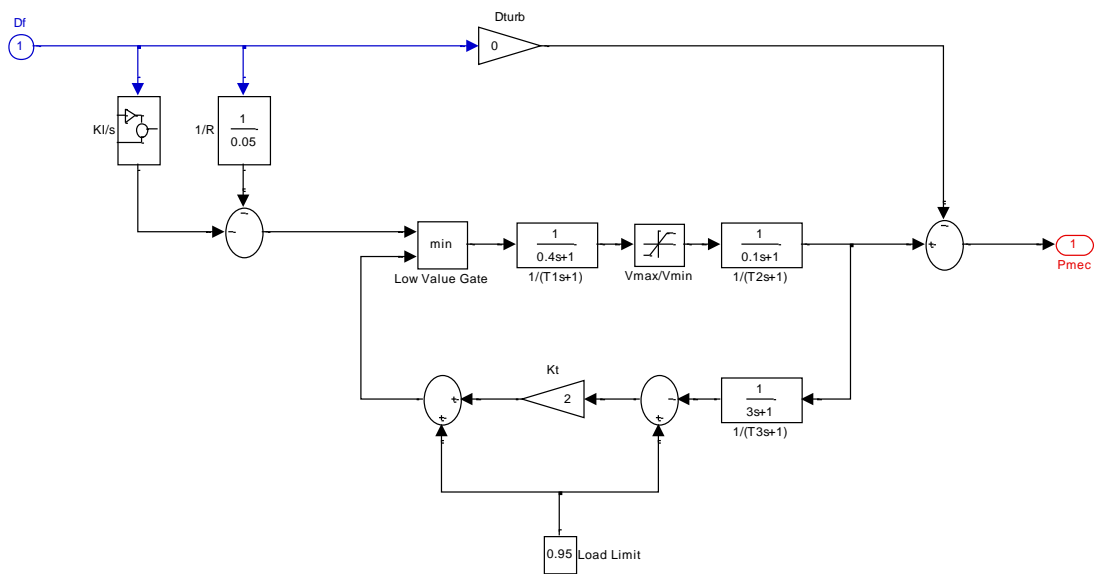


Figura 4.15 - Diagrama de blocos do modelo GAST

Os valores dos parâmetros do modelo GAST utilizados na simulação foram os seguintes:

- T_1 (s): 0,4
- T_2 (s): 0,1
- T_3 (s): 3
- Load Limit (MW): 0,95
- R (p.u.Hz/p.u.MW): 0,05
- K_I (p.u.MW/p.u.Hz): 0,5
- D_{turb} (p.u.MW/p.u.Hz): 0
- K_t (p.u.MW/p.u.Hz): 2
- V_{max} (MW): 1
- V_{min} (MW): -0,05

Após o modelo GAST ter sido modelizado, foram efetuadas as simulações correspondentes às diferentes alternativas em estudo.

Depois de realizadas as várias simulações recorreu-se ao Teste de Hipóteses para verificar qual das alternativas apresentava melhor desempenho de ajuste. O estudo efetuado através do teste de hipóteses encontra-se resumido na figura a seguir apresentada.

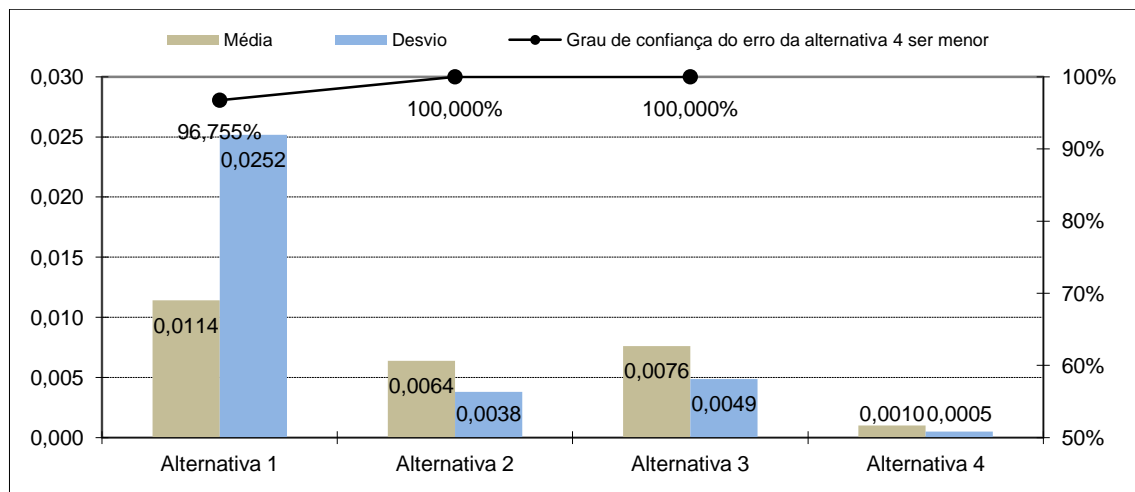


Figura 4.16 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/GAST

No teste de hipóteses estudou-se a hipótese do erro da alternativa com 100 iterações e 100 partículas ter um melhor desempenho de ajuste, quando comparado com cada uma das outras alternativas. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que o nível de confiança com que se pode aceitar que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas tem melhor desempenho de ajuste, que qualquer uma das outras das hipóteses, é sempre superior a 95%. Sendo assim, pode-se concluir que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas é a alternativa com melhor desempenho de ajuste.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos na simulação com menor valor de fitness, de realçar que a simulação com menor valor de fitness foi obtida na série de simulações com 100 partículas e 100 iterações.

Após ter sido executado o programa desenvolvido foram obtidos novos valores para os parâmetros do modelo TGOV1, na tabela a seguir apresentada encontram-se os parâmetros iniciais do modelo TGOV1 bem como os parâmetros obtidos após a execução do programa.

Tabela 4.3 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/GAST

TGOV1 inicial		→	TGOV1 ajustado	
T1 (s)	1		T1 (s)	1,0000
T2 (s)	1,8		T2 (s)	1,8125
T3 (s)	6		T3 (s)	1,0000
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0		Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0,0000
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	1		KI (p.u.MW/p.u.Hz)	0,5109
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,05		R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,0511

Verifica-se que após a execução do programa todos os parâmetros foram alterados, de seguida apresenta-se a evolução do fitness ao longo da simulação.

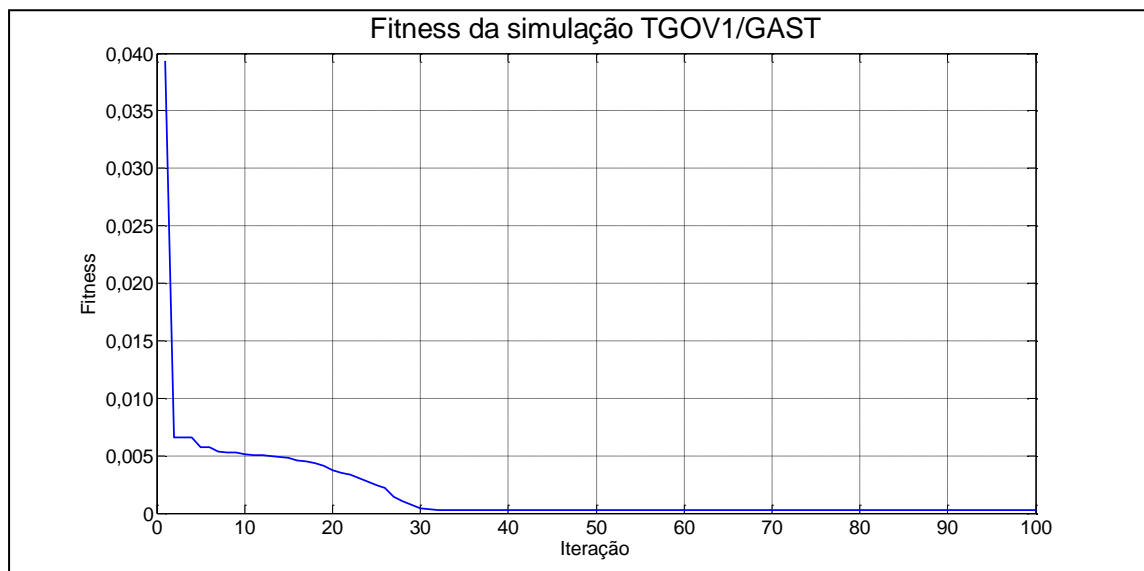


Figura 4.17 - Fitness da simulação TGOV1/GAST

Da análise da figura 4.17 verifica-se que, tal como seria desejável, o valor da fitness final é consideravelmente menor que o inicial. De notar também que a curva é uma curva típica de um algoritmo EPSO, tal como seria de esperar.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 inicial com o do modelo GAST, bem como a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo GAST.

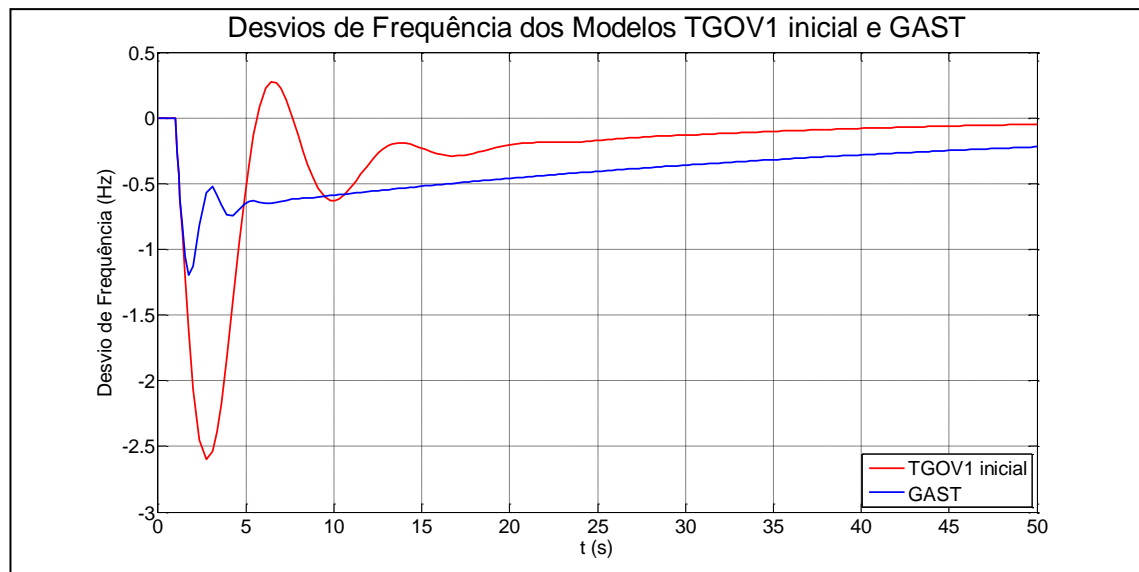


Figura 4.18 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e GAST

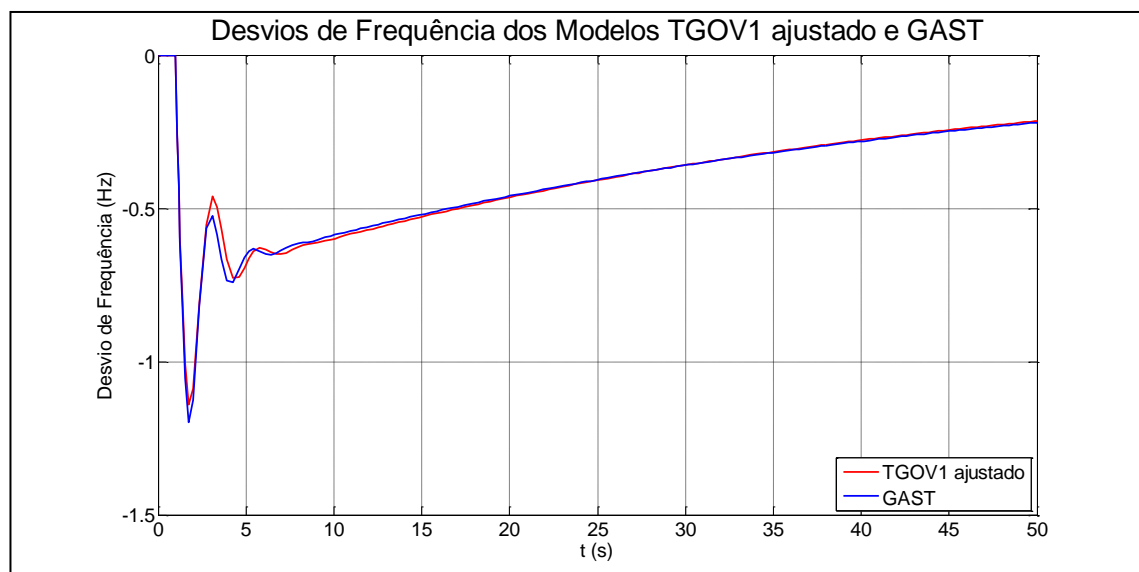


Figura 4.19 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e GAST

Da análise dos figura 4.18, verifica-se que inicialmente o desvio de frequência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo GAST.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de frequência muito mais próximo do modelo GAST tal como se pode verificar na figura 4.19.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de potência mecânica TGOV1 inicial com o do modelo GAST, bem como a comparação do desvio de potência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo GAST.

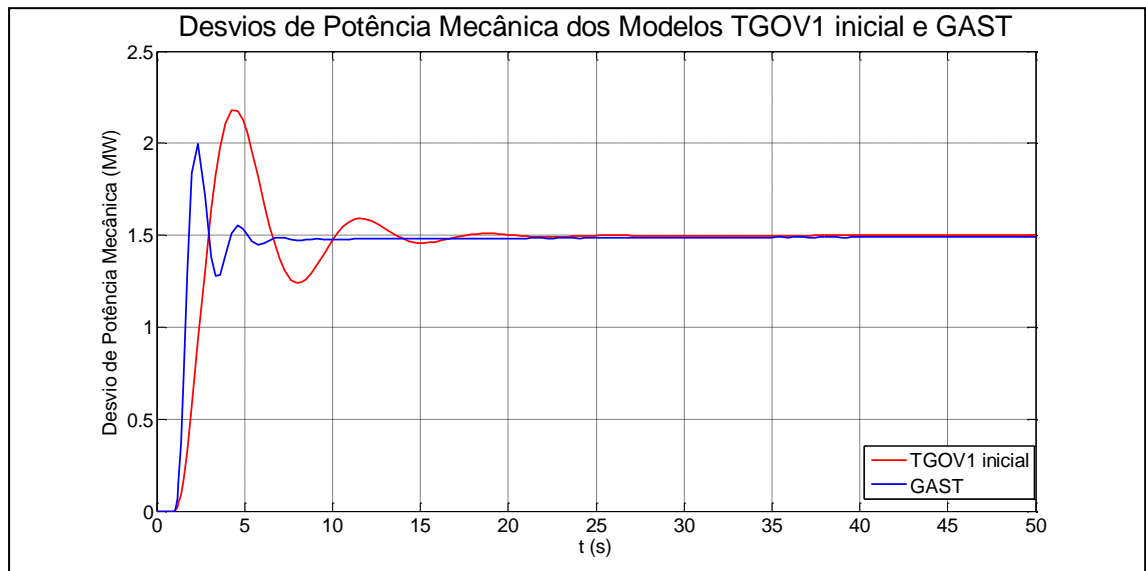


Figura 4.20 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e GAST

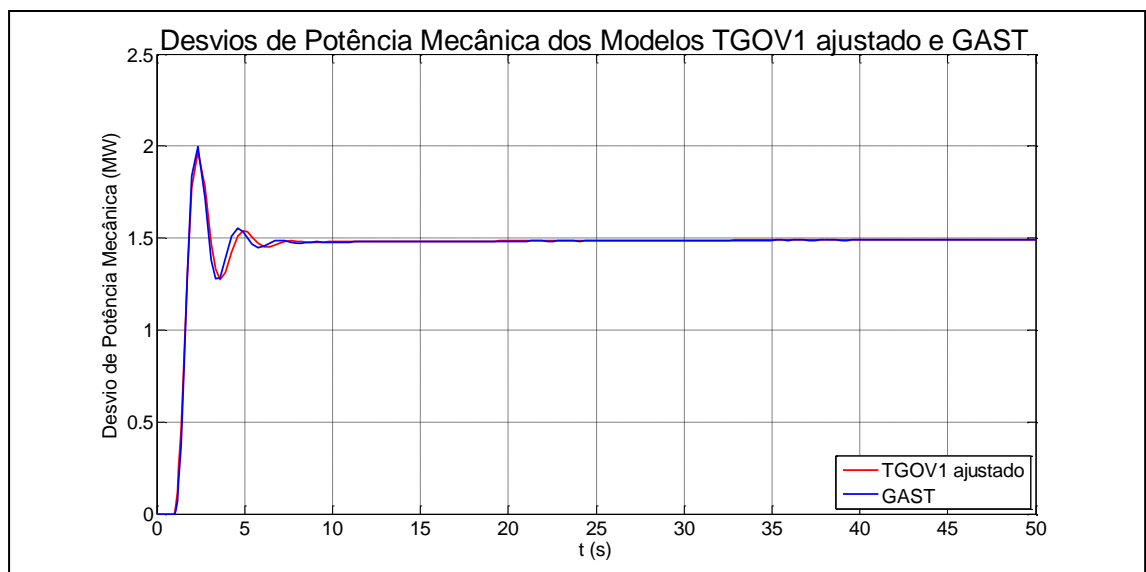


Figura 4.21 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e GAST

Da análise da figura 4.20, verifica-se que inicialmente o desvio de potência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo GAST.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de potência muito mais próximo do modelo GAST tal como se pode verificar na figura 4.21.

Em conclusão, pode-se afirmar que a aplicação do algoritmo desenvolvido foi bastante eficaz para a diminuição das diferenças de resposta dinâmica entre o modelo TGOV1 ajustado e o modelo GAST.

4.5 - IEEEG1

Na figura a seguir é apresentado o modelo IEEEG1 que foi implementado em Matlab.

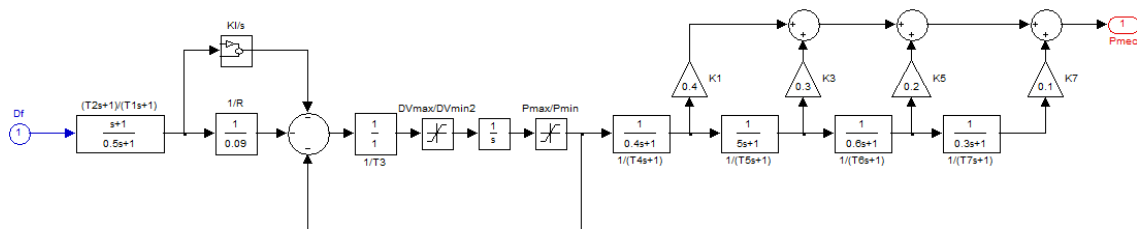


Figura 4.22 - Diagrama de blocos do modelo IEEEG1

Os valores dos parâmetros do modelo GAST utilizados na simulação foram os seguintes:

- T1 (s): 0,5
- T2 (s): 1
- T3 (s): 1
- T4 (s): 0,4
- T5 (s): 5
- T6 (s): 0,6
- T7 (s): 0,3
- K1 (p.u.MW/p.u.Hz): 0,4
- K3 (p.u.MW/p.u.Hz): 0,3
- K5 (p.u.MW/p.u.Hz): 0,2
- K7 (p.u.MW/p.u.Hz): 0,1
- R (p.u.Hz/p.u.MW): 0,09
- KI (p.u.MW/p.u.Hz): 0,5
- DVmax (MW): 0,1
- DVmin (MW): -0,2
- DPmax (MW): 1
- DPmin (MW): 0

Após o modelo IEEEG1 ter sido modelizado, foram efetuadas as simulações correspondentes às diferentes alternativas em estudo.

Depois de realizadas as várias simulações recorreu-se ao Teste de Hipóteses para verificar qual das alternativas apresentava melhor desempenho de ajuste. O estudo efetuado através do teste de hipóteses encontra-se resumido na figura a seguir apresentada.

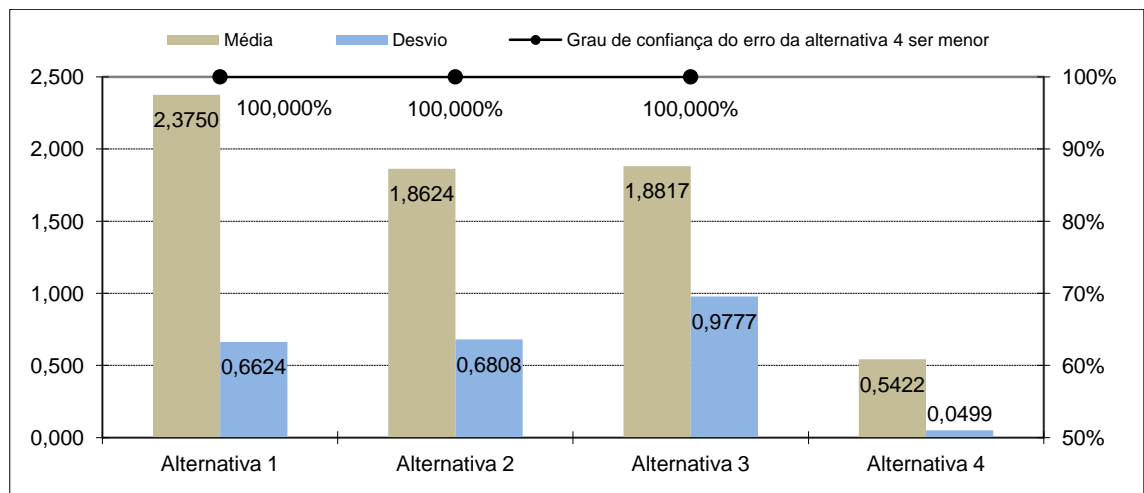


Figura 4.23 - Teste de hipóteses da simulação TGOV1/IEEEG1

No teste de hipóteses estudou-se a hipótese do erro da alternativa com 100 iterações e 100 partículas ter um melhor desempenho de ajuste, quando comparado com cada uma das outras alternativas. Da análise dos resultados obtidos verifica-se que o nível de confiança com que se pode aceitar que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas tem melhor desempenho de ajuste, que qualquer uma das outras das hipóteses, é sempre superior a 95%. Sendo assim, pode-se concluir que a alternativa com 100 iterações e 100 partículas é a alternativa com melhor desempenho de ajuste.

De seguida apresentam-se os resultados obtidos na simulação com menor valor de fitness, de realçar que a simulação com menor valor de fitness foi obtida na série de simulações com 100 partículas e 100 iterações.

Após ter sido executado o programa desenvolvido foram obtidos novos valores para os parâmetros do modelo TGOV1, na tabela a seguir apresentada encontram-se os parâmetros iniciais do modelo TGOV1 bem como os parâmetros obtidos após a execução do programa.

Tabela 4.4 - Valores iniciais e finais de TGOV1 na simulação TGOV1/IEEEG1

TGOV1 inicial		→	TGOV1 ajustado	
T1 (s)	1		T1 (s)	3,4607
T2 (s)	1,8		T2 (s)	1,0489
T3 (s)	6		T3 (s)	2,2173
Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0		Dt (p.u.MW/p.u.Hz)	0,0000
KI (p.u.MW/p.u.Hz)	1		KI (p.u.MW/p.u.Hz)	0,3913
R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,05		R (p.u.Hz/P.u.MW)	0,1995

Verifica-se que após a execução do programa todos os parâmetros foram alterados, de seguida apresenta-se a evolução do fitness ao longo da simulação.

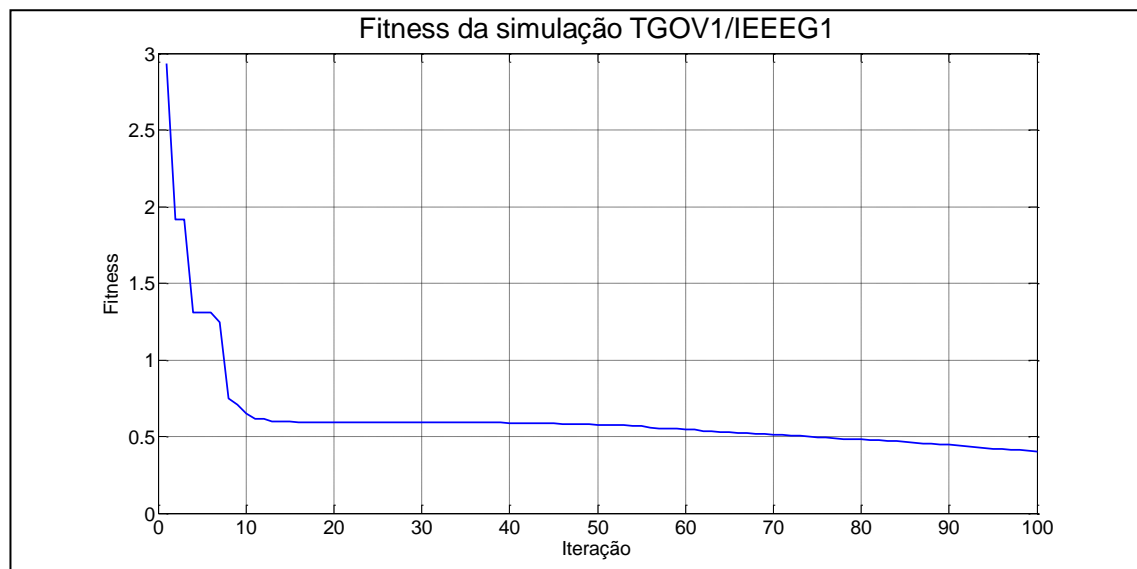


Figura 4.24 - Fitness da simulação TGOV1/IEEEG1

Da análise da figura 4.24 verifica-se que, tal como seria desejável, o valor da fitness final é consideravelmente menor que o inicial. De notar também que a curva é uma curva típica de um algoritmo EPSO, tal como seria de esperar.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 inicial com o do modelo IEEEG1, bem como a comparação do desvio de frequência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo IEEEG1.

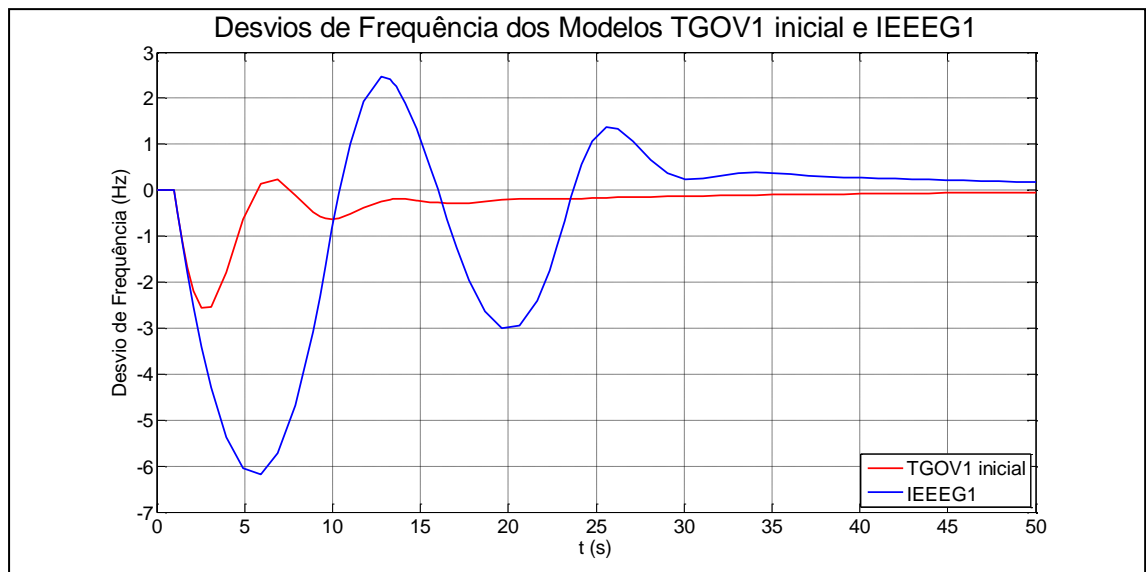


Figura 4.25 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 inicial e IEEEG1

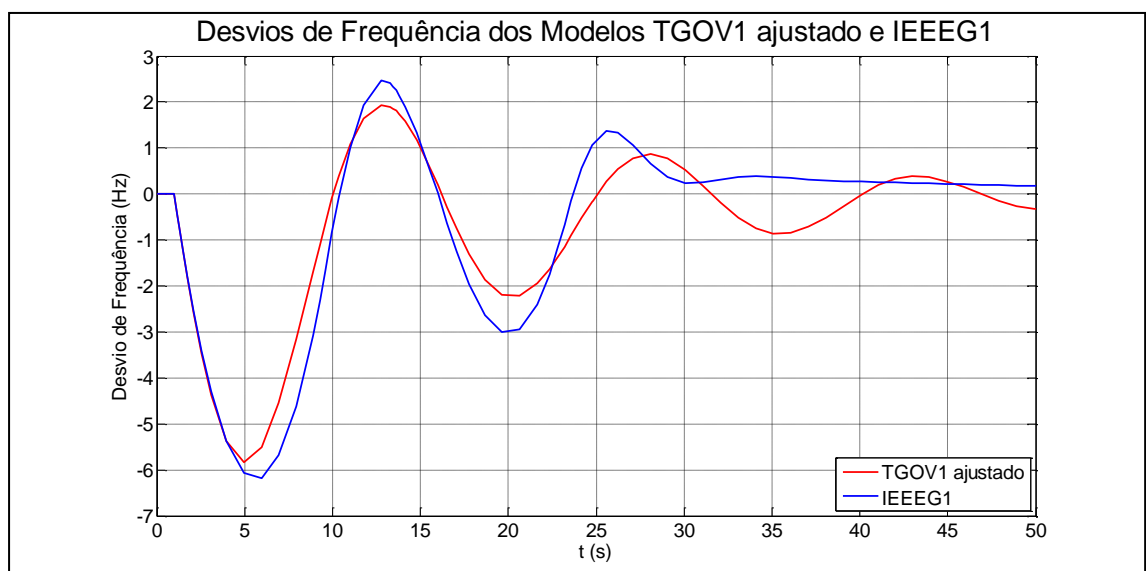


Figura 4.26 - Desvios de frequência dos modelos TGOV1 ajustado e IEEEG1

Da análise dos figura 4.25, verifica-se que inicialmente o desvio de frequência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo IEEEG1.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de frequência muito mais próximo do modelo IEEEG1 tal como se pode verificar na figura 4.26.

Nas figuras seguintes apresenta-se a comparação do desvio de potência mecânica TGOV1 inicial com o do modelo IEEEG1, bem como a comparação do desvio de potência do modelo TGOV1 ajustado com o do modelo IEEEG1.

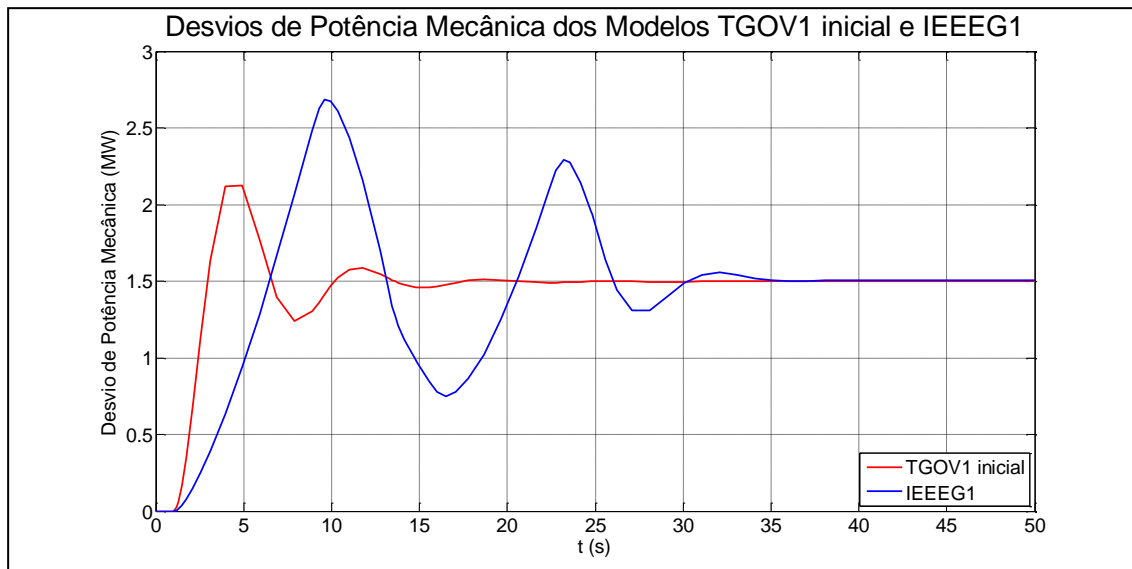


Figura 4.27 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 inicial e IEEE1

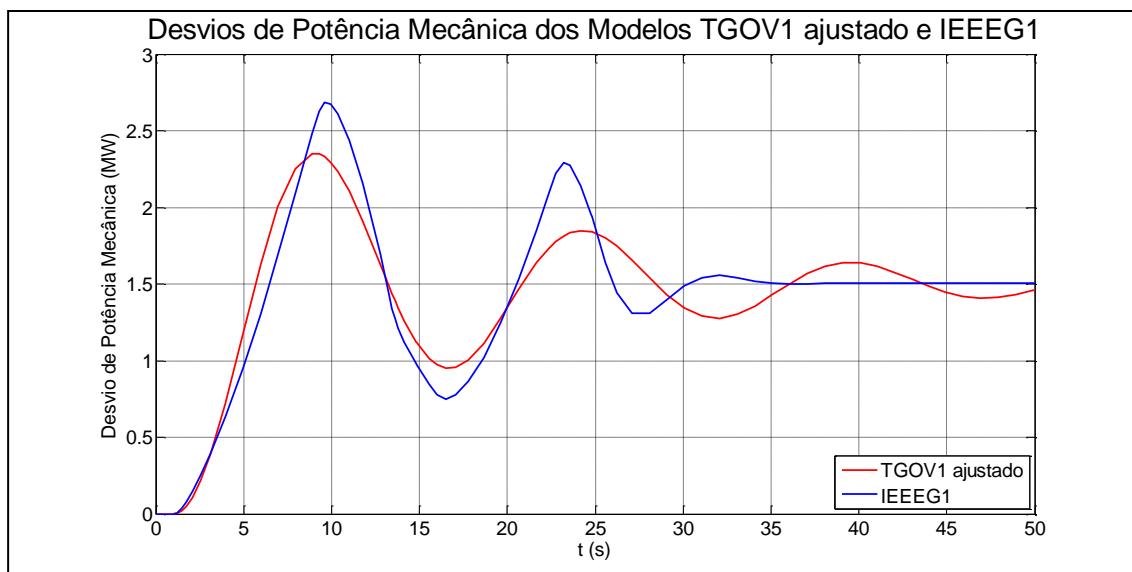


Figura 4.28 - Desvios de potência mecânica dos modelos TGOV1 ajustado e IEEE1

Da análise da figura 4.27, verifica-se que inicialmente o desvio de potência do modelo TGOV1 era bastante diferente do desvio do modelo IEEE1.

Após se ter executado o programa de otimização o modelo TGOV1 passou a ter um desvio de potência muito mais próximo do modelo IEEE1 tal como se pode verificar na figura 4.28.

Em conclusão, pode-se afirmar que a aplicação do algoritmo desenvolvido foi bastante eficaz para a diminuição das diferenças de resposta dinâmica entre o modelo TGOV1 ajustado e o modelo IEEEG1.

Capítulo 5

Conclusões

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que a resposta dinâmica do regulador de frequência típico ajustado é bastante próxima do regulador de frequência com o qual é comparado.

Em todos os casos de estudo se verificou uma assinalável diminuição do valor da função de fitness. Significa assim que após a aplicação do algoritmo EPSO a resposta dinâmica do regulador de frequência TGOV1 ajustado é mais próxima da resposta dinâmica do regulador com o qual está a ser comparado, do que era inicialmente.

Em conclusão pode-se afirmar que o programa desenvolvido no presente trabalho foi concluído com êxito, foi demonstrado que um programa baseado num algoritmo de otimização EPSO é uma solução viável para ajustar os parâmetros de um modelo típico do regulador de frequência de uma máquina térmica com turbina a vapor, e assim minimizar as diferenças de resposta dinâmica fornecida pelos dois modelos (o modelo típico ajustado e o fornecido pelo fabricante).

Referências

- [1] Helena Vasconcelos, Apontamentos da unidade curricular DESI, do 5º ano do MIEEC da área de energia.
- [2] Apontamentos da unidade curricular SCSEE, do 4º ano do MIEEC da área de energia.
- [3] Vladimiro Miranda, “Computação Evolucionária: Uma Introdução”
- [4] M. Helena Vasconcelos, “Avaliação e Controlo de Segurança de Redes com grande Penetração Eólica com base em Métodos de Aprendizagem Automática”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2007.