



USO DE ALGORITMO GENÉTICO NA OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE SINTONIA DE CONTROLADOR PID COM DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Luciano Resende Dias¹

Mestre em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional

Ítalo de Oliveira Matias²

Doutor em Sistemas Computacionais

Milton Erthal Júnior³

Doutor em Produção Vegetal

Diego da Silva Sales⁴

Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais

Resumo

Este trabalho teve como objetivo utilizar um Algoritmo Genético (AG) para otimizar o tempo de acomodação de um controlador Proporcional Integral e Derivativo com 2 graus de Liberdade (PID2L) durante seu processo de sintonia. Para obter o vetor de parâmetros ótimos desta sintonia, foram propostas quatro configurações com

¹ Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ – ldias@iff.edu.br

² Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ – italo@ucam-campos.br

³ Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ - miltonerthal@hotmail.com

⁴ Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ - diegosalesbr@gmail.com



métodos de seleção de indivíduos e pontos de *crossover* distintos. A quarta configuração proposta foi considerada a melhor com os tempos de acomodação $t_s \text{ degrau} = 10,00$ segundos e $t_s \text{ rampa} = 9,97$ segundos, uma vez que o tempo de acomodação ideal estabelecido neste trabalho foi de 10,00 segundos com uma variação de 20%. Os resultados obtidos atestam que o AG pode ser utilizado de forma satisfatória no processo de sintonia de controlador PIDL2.

Palavras-chave: Algoritmo Genético; Processo de Sintonia; Controlador PDI2L.

Abstract

This work aimed to use a Genetic Algorithm (GA) to optimize the settling time of a Proportional Integral and Derivative controller with 2 degrees of freedom (PID2L) during its tuning process. For the vector of optimal parameters of this adjust, have been proposed four settings with selection methods of individuals and different crossover points. The fourth proposed configuration was considered the best with settling times $t_s \text{ degrau} = 10.00$ seconds and $t_s \text{ rampa} = 9.97$ seconds as the optimal settling time established in this work was 10.00 seconds with a 20% variance. The results show that the AG can be used satisfactorily in the PIDL2 controller tuning process.

Keywords: Genetic Algorithm; Tuning process; PDI2L controller.



1.Introdução

Em sistemas elétricos industriais, a potência ativa é a responsável por gerar trabalho útil. Já a potência reativa é utilizada para gerar o campo magnético no caso de cargas compostas por bobinas, mas esta forma de potência não é convertida em calor ou outra forma útil de trabalho (FILHO, 2008). Um alto consumo de energia reativa provoca uma redução da eficiência do sistema acarretando em multas emitidas pelas concessionárias de energia elétrica além de outros problemas relacionados aos equipamentos elétricos (ÇOLAK; BAYINDIR; BAY, 2003).

Tradicionalmente, a compensação de energia reativa em instalações elétricas industriais tem sido feita com a instalação de bancos de capacitores fixos ou variáveis onde um valor de referência para o fator de potência é definido. Apesar de serem utilizados amplamente devido à sua facilidade de instalação, custo e simplicidade no projeto, os bancos de capacitores possuem respostas lentas às mudanças de condições da carga, problemas mecânicos, sub ou sobrecompensação e inserção de harmônicos na rede elétrica (SAGIROGLU; ÇOLAK; BAYINDIR, 2006).

Estes problemas podem ser reduzidos com a utilização de motores síncronos, pois, dependendo da tensão que é aplicada à bobina excitação, estas máquinas podem operar como compensadores fornecendo energia reativa para instalação. No entanto, é difícil estimar os parâmetros de funcionamento da máquina tais como corrente de excitação e fator de potência, devido à complexidade existente nas relações entre seus parâmetros. Por isso, métodos de estimação de parâmetros têm sido propostos utilizando vários tipos de controladores como, por exemplo, o controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID), com o objetivo de tornar a



compensação de energia reativa mais eficiente e robusta (KAHRAMAN; BAYINDIR; SAGIROGLU, 2012).

O controlador PID é amplamente utilizado para controle em diversos tipos de sistemas, porém, soluções analíticas podem acarretar um custo elevado em seu desenvolvimento. Nesta situação, métodos heurísticos tais como: algoritmos genéticos (AG), enxame de partículas (EP), redes neurais artificiais (RNAs) são utilizados na sintonia de controladores PID com o objetivo de encontrar soluções de qualidade num tempo viável em determinado espaço de busca com baixo custo de obtenção (HUANG; LAM, 1997).

Este trabalho teve como objetivo utilizar um algoritmo genético para encontrar o vetor de parâmetros ótimo para realização da sintonia de um controlador PID com dois graus de liberdade, que poderá ser utilizado no controle de excitação de uma máquina síncrona trifásica para correção de fator de potência.

2. Embasamento Teórico

Bayindir e colaboradores apresentaram um controle PID para um motor síncrono operando em várias situações de trabalho e com diferentes correntes de excitação. Este controlador foi implementado em um micro controlador para efetuar a correção on-line (BAYINDIR et al., 2009).

O grau de liberdade de um sistema de controle é definido como o número de funções de transferência de malha fechada, que podem ser ajustadas de forma independente. Quando um controlador PID com um grau de liberdade (PID1L) consegue otimizar a resposta a um distúrbio que ocorre no sistema, a resposta ao set-point é prejudicada, e vice-versa. Com a utilização de um controlador com dois



graus de liberdade (PID2L) esta situação é eliminada, pois neste tipo de controlador é possível obter uma resposta ótima para os distúrbios do sistemas e para o set-point (ARAKI; TAGUCHI, 2003).

Shu-Qiu e colaboradores propuseram um algoritmo de controle de motor síncrono através de um PID2L com o objetivo de eliminar as limitações de controle que existem quando um PID1L é utilizado. A preposição consegue ter um ponto de equilíbrio entre resposta a distúrbios do sistema e resposta ao set-point (SHU-QIU et al., 2007).

Técnicas de Inteligência Computacional (IC) têm sido largamente utilizadas como ferramentas de otimização de sistemas de controle.

Herreros e colaboradores abordam o controle PID como um problema multi-objetivo que requer especificações que são competitivas entre si. Um controlador bem projetado deve atender a todos os requisitos para um desempenho satisfatório. Neste trabalho é apresentado um AG para realizar a sintonia do controlador proposto (HERREROS; BAEYENS; PERÁN, 2002).

Preitl e colaboradores apresentam aspectos de sistemas fuzzy com dois graus de liberdade com foco em controladores PI-fuzzy e PID-fuzzy. A metodologia de sintonia é baseada no mapeamento dos parâmetros de controladores PI e PID lineares e passados para controladores fuzzy (PREITL et al., 2010).

2.1. Correção de Fator de Potência

As instalações elétricas, de modo geral, são constituídas por cargas resistivas e reativas indutivas que desenvolvem potências ativa (P) e reativa (Q), respectivamente. A combinação destas duas formas de potência é chamada de



potência aparente (S) e representa a potência total que a fonte deve fornecer ao circuito (MARKUS, 2011).

Quando o consumo de energia reativa da instalação é elevado, o valor de S aumenta provocando uma redução na eficiência do circuito. Um dado importante que representa o percentual da potência total (S) fornecida pela fonte que efetivamente é convertido em trabalho útil através da potência ativa é chamado de Fator de Potência (FP) ou cosseno φ e pode ser representado matematicamente pela equação (2.1).

$$\cos \varphi = \frac{P(\text{potência ativa})}{S(\text{potência aparente})} \quad (2.1)$$

Para aumentar a eficiência da instalação é necessário reduzir a quantidade de energia reativa que a fonte deve fornecer ao circuito. Esta tarefa pode ser executada através de um fornecimento auxiliar de energia reativa chamado de sistema de correção de fator de potência ou sistema de compensação de reativos que, através do ajuste de parâmetros dos equipamentos instalados, pode manter o fator de potência do sistema em um determinado valor (ÇOLAK; BAYINDIR; BAY, 2003).

Um sistema de correção de fator de potência pode ser constituído de (ÇOLAK; BAYINDIR; BAY, 2003):

- Bancos de capacitores fixos ou automáticos;
- Motores síncronos trabalhando em regime de sobre excitação.

Capacitores são sensíveis as influências de problemas relacionados à qualidade de energia elétrica no sistema, além de possuírem um tempo de resposta lento na correção, são sujeitos a sub-correção e sobre-correção em função de seu chaveamento. Motores síncronos têm sido usados para compensar potência reativa,

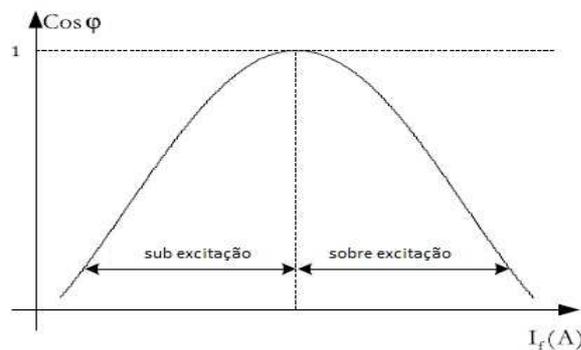


Figura 2.1: Exemplo de curva V determinando as regiões de operação para um motor síncrono.

Fonte: Adaptado de Çolak, Bayindir e Bay (2003).

2.2. Controlador PID com Dois Graus de liberdade (PID2L)

Um sistema de controle deve comparar o valor desejado (set-point) com o sinal de realimentação do processo e gerar uma correção do erro encontrado objetivando eliminá-lo ou reduzi-lo a um valor aceitável dentro das definições do projeto (OGATA, 2011).

Para executar esta tarefa, o controlador PID é amplamente utilizado devido à sua estrutura simples, facilidade de entendimento de seu funcionamento e desempenho robusto para uma grande faixa de aplicações (DOS SANTOS COELHO, 2009).

Este tipo de controlador apresenta três ações de controle: proporcional (P), integrativa (I) e derivativa (D). A equação (2.2) pode ser utilizada para representar a ação de controle PID.

$$u(t) = K_p \times e(t) + \frac{K_p}{T_i} \times \int_0^t e(t) dt + K_p \times T_d \times \quad (2.2)$$



O controlador PID apresenta a característica de eliminar o erro (e) em regime permanente através de sua ação integrativa e pode antecipar o futuro por causa da ação derivativa (HERREROS; BAEYENS; PERÁN, 2002). O desempenho de um PID é fortemente impactado pelo ajuste de seus parâmetros (ganho proporcional K_p , tempo integrativo T_i e tempo derivativo T_d), as particularidades do sistema a ser controlado como não-linearidades e tempo de atraso podem resultar em um processo de sintonia mais complexo, nestes casos com o uso de técnicas de otimização como algoritmos genéticos, redes neurais artificiais e uso de lógica fuzzy é possível desenvolver controladores inteligentes (ZHANG et al., 2009).

Existem processos em que a variável que deve ser controlada ou o set-point permanecem constantes, uma boa rejeição a distúrbios (controle regulatório) deve ser obtida. Mas existem processos em que o set-point precisa sofrer alterações em função das variações do processo, neste caso é necessário uma boa resposta transiente (servo controle) (ALFARO; VILANOVA, 2013).

No presente trabalho o controle de excitação do motor síncrono se encaixa no segundo caso por ser um problema multi-objetivo no que se refere à característica de não-linearidade da máquina, tornando inapropriado o uso de técnicas de controle linear para atingir uma alta performance (KUMAR; GAUR; MITTAL, 2014).

A adição de parâmetros para sintonia em consequência do uso de um controlador PID2L requer métodos adequados para atender as necessidades do processo (ALFARO; VILANOVA; ARRIETA, 2008). Na Tabela 2.1 são apresentados diversos trabalhos que utilizam métodos de sintonia de controladores PID2L.



Tabela 2.1: Trabalhos com sintonias de controladores PID2L.

Descrição do trabalho	Referência
Sintonia analítica para um controlador em cascata realizada	(ALFARO; VILANOVA; ARRIETA, 2008)
Otimização através de enxame de partículas (EP) para sintonia de um controlador fuzzy (CF) com dois graus de liberdade	(BINGÜL; KARAHAN, 2011)
Sintonia do controlador com dois graus de liberdade é realizada utilizando uma simulação do sistema imunológico do ser humano	(DONG HWA KIM, 2002)
Sintonia de um controlador de um processo de geração de energia em uma usina nuclear através de uma rede neural	(DONG HWA KIM, 2004)

Fonte: Autoria Própria

3. Materiais e Métodos

3.1. Equipamentos Utilizados

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Conversão de Energia (LABCE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF) campus Campos-Guarus. Foram realizados ensaios de partida para obtenção de sua curva V com uma máquina síncrona marca Lavil, de 1800 rpm, tensão de excitação 12Vcc e corrente de excitação de 1,7^a, como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Configuração do motor síncrono da bancada SD-2100b.

Frequência de Operação (HZ)	Potência (KVA)	RPM	Número de Pólos	Tensão (Vac)	Tensão de Excitação (Vcc)	de	Corrente de Excitação (Acc)
60	1	1800	4	220 / 380	12		1,7

Fonte: Autoria própria.

Os ensaios com a máquina síncrona foram realizados com o objetivo de criar um banco de dados que foi utilizado para montar o modelo de simulação do controlador proposto. A máquina usada, exibido na Figura 2.1 (a) faz parte do kit



didático de máquinas elétricas rotativas do LABCE, Minipa modelo SD-2100b para ensaios com máquinas elétricas rotativas, exposto na Figura 2.1 (b).



Figura 3.1: (a) Motor síncrono utilizado nos ensaios em detalhe. (b) Bancada didática de máquinas elétricas do LABCE, onde pode ser visualizado o painel de controle (I), o motor síncrono (II), o motor assíncrono (III) e o motor de corrente contínua (IV).

Fonte: Autoria própria.

3.2.Coleta de Dados

Para a realização dos ensaios com a bancada didática os seguintes passos foram executados:

1. Partida da máquina síncrona até que o eixo desta atinja uma velocidade de próxima da velocidade de sincronismo, cerca de 1700rpm;



2. A partir deste momento o enrolamento de campo da máquina foi alimentado com tensão contínua para que ele pudesse alcançar a velocidade de sincronismo e possibilitasse sua operação como compensador de reativos;
3. Com o motor funcionando na velocidade de sincronismo, a corrente de excitação foi ajustada para seu valor nominal de operação para que o motor operasse como carga resistiva e FP unitário;
4. Após esta etapa, a corrente de excitação foi reduzida para valores abaixo da corrente nominal até que o menor fator de potência indutivo possível fosse atingido;
5. Em seguida, a corrente de excitação foi elevada para valores acima da corrente nominal com a finalidade de alcançar o menor FP capacitivo dentro dos limites da máquina.

Os passos citados acima foram executados com a máquina funcionando sem carga conectada em seu eixo. Esta condição de operação foi selecionada para obter uma faixa mais ampla de valores de fator de potência (ÇOLAK; BAYINDIR; BAY, 2003).

Para gerar a equação de regressão da curva V do motor, o conjunto de dados com 24 registros de fator de potência provenientes do ensaio foi inserido no programa *MATLAB®*, que possui um conjunto de ferramentas de regressão matemática (*Curve Fitting Toolbox*). Desta maneira, foi possível obter uma equação que representasse o comportamento do fator de potência em função da corrente de excitação da máquina. A função criada pelo *MATLAB®* foi utilizada no



desenvolvimento do AG que teve como objetivo sintonizar o controlador PID2L proposto neste trabalho.

3.3.Sintonia do Controlador

3.3.1.Controlador PID2L

O controlador PID2L desenvolvido neste trabalho é composto de duas partes: controlador PID1 e controlador PD2. O controlador PID1 possui as ações de controle proporcional, integral e derivativa, enquanto que o controlador PD2 possui apenas as ações de controle proporcional e derivativa. Com a adição do controlador PD2 ao controlador PID1, o sistema de controle torna-se mais robusto e confiável devido à atuação simultânea dos controladores. Com isso, ocorre um aumento do desempenho do sistema na obtenção de uma resposta adequada aos distúrbios que o sistema controlado pode apresentar (OGATA, 2011).

No desenvolvimento do controlador foram definidos o valor do set-point (valor de referência), a variável de saída do controlador e a variável de processo controlada. Neste trabalho, o set-point foi escolhido com base na resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sendo este 0,95 indutivo (ANNEE, 2010). A variável de saída escolhida foi a corrente de excitação (I_f) que deve existir na bobina de excitação do motor. A variável de processo escolhida foi o fator de potência do sistema, que representa a soma entre o fator de potência da carga simulada e o fator de potência do motor síncrono. Com estes valores definidos torna-se possível comparar o valor de referência com a variável de processo e encontrar o erro existente através da equação (3.1).



$$e = FP_{REFERENCIA} - FP_{SISTEMA} \quad (3.1)$$

O tempo de resposta do controlador representa o tempo decorrido entre a ocorrência de um distúrbio e o momento que o erro é estabilizado dentro do limite de 2% acima ou abaixo do valor de referência.

Neste trabalho o tempo de resposta, também conhecido como tempo de acomodação, foi mensurado para duas situações distintas: os possíveis distúrbios que a carga do sistema pode apresentar; e as possíveis variações no valor do *set-point*.

Para realizar esta tarefa duas funções foram criadas: *fitness_degrau* e *fitness_rampa*. A função *fitness_degrau* representa os distúrbios provocados pelas variações da carga do sistema e a função *fitness_rampa* representa as variações no *set-point*.

O tempo de acomodação (t_s) que as funções retornam corresponde ao tempo que o controlador, a partir do instante que ocorre o distúrbio, leva para deixar o erro (e) dentro de um limite de 2% do valor do *set-point*. Como o *set-point* adotado neste trabalho foi 0,95, o valor de t_s deve ser tal que, a variável de processo atenda o seguinte requisito: $0,93 \leq \text{fator de potência do sistema} \leq 0,97$. Os pseudo-códigos das funções *fitness_degrau* e *fitness_rampa* são exibidos respectivamente nas Figura 3.2 e Figura 3.3.



Algoritmo_Função_Degrau

inicio algoritmo

seleciona carga do banco de dados de cargas
calcula fator de potência da carga selecionada
define parâmetros PID1
define parâmetros PD2
tempo := tempo de simulação desejado
set-point := valor de fator de potência de referência

enquanto tempo de simulação não for alcançado **faça**

inicio enquanto

calcula erro
PID1
PD2
calcula corrente de excitação

fim enquanto

calcula tempo de resposta

fim algoritmo

Figura 3.2: Pseudo-código mostrando a sequência de execução da função *fitness_degrau*.

Fonte: Autoria própria.



Algoritmo Função Rampa

inicio algoritmo

seleciona carga do banco de dados de cargas
calcula fator de potência da carga selecionada
define parâmetros PID1
define parâmetros PD2
tempo := tempo de simulação desejado
set-point := valor do fator de potência de referência

enquanto tempo de simulação não for alcançado **faça**

inicio enquanto

set-point := *set-point* – período de amostragem
calcula erro
PID1
PD2
calcula corrente de excitação

fim enquanto

calcular tempo de acomodação

fim algoritmo

Figura 3.3: Pseudo-código mostrando a sequência de execução da função *fitness_rampa*.

Fonte: Autoria própria.

3.3.2. Algoritmo Genético

A implementação computacional do AG proposto neste trabalho utilizou uma representação binária já proposta, com a adição da técnica de elitismo, onde o melhor indivíduo de cada interação é inserido na população da interação seguinte (MICHALEWICZ, 1996). O AG proposto possui uma população com tamanho fixo, onde cada indivíduo que compõe esta população foi gerado aleatoriamente dentro de um intervalo estabelecido previamente. Cada indivíduo possui cinco grupos de



genes que correspondem à cinco parâmetros distintos do controlador PID2L. Os três primeiros grupos de genes estão relacionados ao ganho proporcional (Kp1), tempo integrativo (Ti1) e tempo derivativo (Td1) do controlador PID1 e os dois últimos grupos de genes representam o ganho proporcional (Kp2) e o tempo derivativo (Td2) do controlador PD2, conforme ilustrado na Figura 3.4.

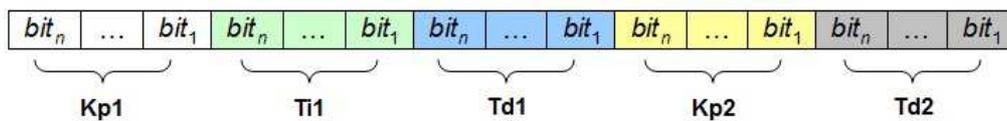


Figura 3.4: Codificação binária dos indivíduos que representam possíveis soluções para o problema tratado.

Fonte: Autoria própria.

Cada interação do AG retorna um vetor contendo os valores que são utilizados para realizar o processo de sintonia do controlador PID2L. Cada vetor utilizado na configuração do controlador resulta em um tempo de acomodação específico. Portanto, o objetivo do AG implementado, é encontrar o vetor de parâmetros que quando utilizado na sintonia do controlador PID2L resulte em um tempo de acomodação que atenda os critérios definidos no trabalho.

Para mensurar o tempo de acomodação correspondente à cada vetor de configuração retornado pelo AG, foi necessário criar uma função de avaliação. Esta função calcula a aptidão de cada indivíduo através dos valores de tempo de acomodação (t_s) obtidos com as funções *fitness_degrau* e *fitness_rampa* apresentados na equação (3.2).

$$aptidao = [| (t_s \text{ degrau} - 10) / 2 |] + [| (t_s \text{ rampa} - 10) / 2 |] \quad (3.2)$$

Em que:



- $t_{s\text{degrau}}$ é o tempo de acomodação retornado pela função fitness_degrau e;
- $t_{s\text{rampa}}$ é o tempo de acomodação retornado pela função fitness_rampa .

Na elaboração da função de aptidão do AG proposto, considerou-se que uma boa solução foi encontrada quando ($|t_s - 10| \leq 2$). Esta condição foi escolhida pois no desenvolvimento deste trabalho, o valor considerado ideal para o tempo de acomodação do sistema foi 10 segundos, admitindo-se uma tolerância de $\pm 20\%$.

Desta forma, analisando o primeiro termo da equação (3.2), quando $|t_{s\text{degrau}} - 10| = 2$, o primeiro termo será ($|(t_{s\text{degrau}} - 10)/2| = 1$); para situações em que ($|t_{s\text{degrau}} - 10| > 2$), o valor do termo será ($|(t_{s\text{degrau}} - 10)/2| > 1$) e quando a diferença ($|t_{s\text{degrau}} - 10|$) resultar em um valor igual a zero, teremos ($|(t_{s\text{degrau}} - 10)/2| = 0$). A mesma análise é aplicada ao segundo termo da equação (3.2) ($|(t_{s\text{rampa}} - 10)/2|$). Desta forma, é possível identificar os indivíduos que apresentam boas soluções para o problema.

Neste trabalho, o indivíduo que alcançar aptidão igual a zero é considerado uma solução perfeita para o problema, pois neste caso as funções fitness_degrau e fitness_rampa retornaram valor zero. Mas outras soluções são permitidas, pois valores de aptidão onde ($0 < \text{aptidão} \leq 2$) são considerados ótimos indivíduos e que, certamente, atendem aos critérios de tempo de acomodação e tolerância desejados. Indivíduos que possuem aptidão com valores ($2 < \text{aptidão} \leq 20$), representam indivíduos que podem atender aos critérios estabelecidos, mas não são garantia de uma boa solução, pois, neste caso, existe a possibilidade de apenas uma das



funções de *fitness* retornar um valor que atenda aos critérios desejados. Os indivíduos com aptidão superior a 20 são descartados, pois representam soluções inviáveis para o problema tratado.

Dois métodos de seleção de indivíduos foram utilizados neste trabalho: o método de seleção da roleta e o método de seleção por torneio. Como o problema tratado neste trabalho é de minimização, indivíduos com os menores valores de aptidão são considerados soluções melhores e possuem maiores chances de serem escolhidos pela roleta. Na seleção realizada pelo método do torneio, dois indivíduos são escolhidos para participar do processo de seleção em cada rodada.

Para a execução do AG, foram utilizadas quatro configurações contendo métodos de seleção e quantidade de pontos de *crossover* diferentes, como pode ser verificado na **Tabela 3.2**. Para cada configuração, foi criada uma população contendo 100 indivíduos, onde cada característica do cromossomo foi gerada aleatoriamente dentro do intervalo 0 a 10, a probabilidade de *crossover* e a probabilidade de mutação foram fixadas em 60% e 1% respectivamente e 500 interações do AG foram executadas em cada configuração.



Tabela 3.2: Parâmetros escolhidos para seleção e cruzamento de indivíduos em cada configuração do AG.

Configuração	Método de seleção	Qtde. de pontos no <i>crossover</i>
1	Roleta	1 ponto
2	Roleta	2 pontos
3	Torneio	1 ponto
4	Torneio	2 pontos

Fonte: Autoria própria.

4.Resultados

Na etapa de modelagem da máquina síncrona instalada na bancada didática utilizada neste trabalho, foi necessário desenvolver um modelo matemático que representasse a relação entre a corrente de excitação e seu fator de potência. Para tal, a curva V da máquina foi obtida, como pode ser verificado na Figura 4.1.

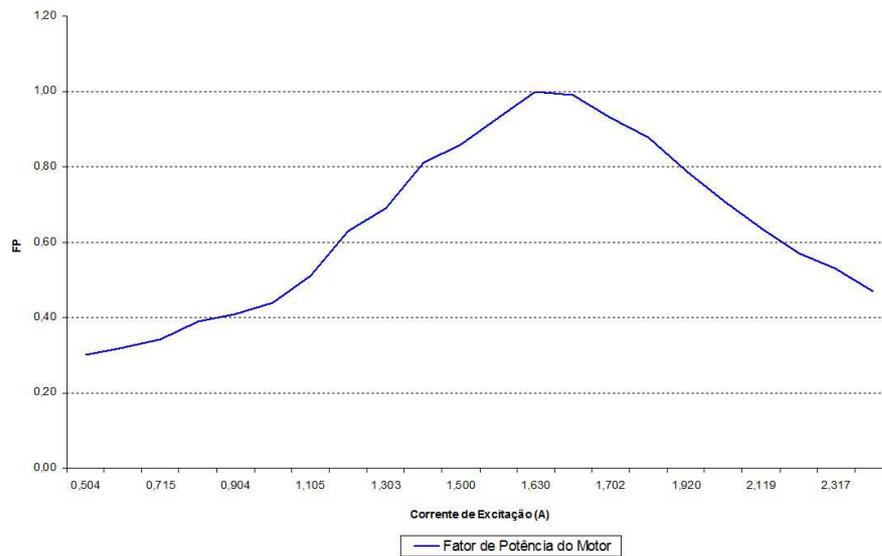


Figura 4.1: Curva V utilizada para gerar o modelo matemático do motor síncrono.

Fonte: Autoria própria.

Com os dados gerados através da curva V do motor, foi possível utilizar o módulo de regressão matemática *Curve Fitting Tool* do *MATLAB®* para gerar a equação (4.1).

$$FP(I) = \sum_{n=1}^6 a_n \times \text{sen}(b_n \times (I + c_n)) \quad (4.1)$$

Na equação (4.1), os coeficientes a, b e c foram gerados automaticamente pelo *MATLAB®* através do método de soma sucessiva de senos. Esta função foi utilizada para determinar o valor do fator de potência de saída da máquina em função da corrente de excitação enviada pelo controlador PID2L.



4.1. Resultados da Sintonia do Controlador

O processo de sintonia do controlador PID2L foi realizado através da execução do AG proposto neste trabalho. Os resultados obtidos após a execução de cada configuração proposta são mostrados nas seções 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4.

4.1.1. Configuração 1

Após a execução do AG utilizando as opções da configuração 1, o melhor conjunto de parâmetros encontrados para o controlador PID2L foi: $K_p1 = 0,89$; $T_i1 = 9,97$; $T_d1 = 0,04$; $K_p2 = 0,06$ e $T_d2 = 0,43$. Quando os parâmetros encontrados são inseridos nas funções *fitness_degrau* e *fitness_rampa*, torna-se possível obter o tempo de acomodação $t_s\text{ degrau} = 10,1$ segundos e o tempo $t_s\text{ rampa} = 9,88$ segundos. Aplicando estes valores na equação (3.2), é retornado o valor 0,11 segundos que representa o valor da aptidão do melhor indivíduo. A evolução da aptidão dos melhores indivíduos gerados em cada interação do AG utilizando a configuração 1 pode ser verificado na Figura 4.2.

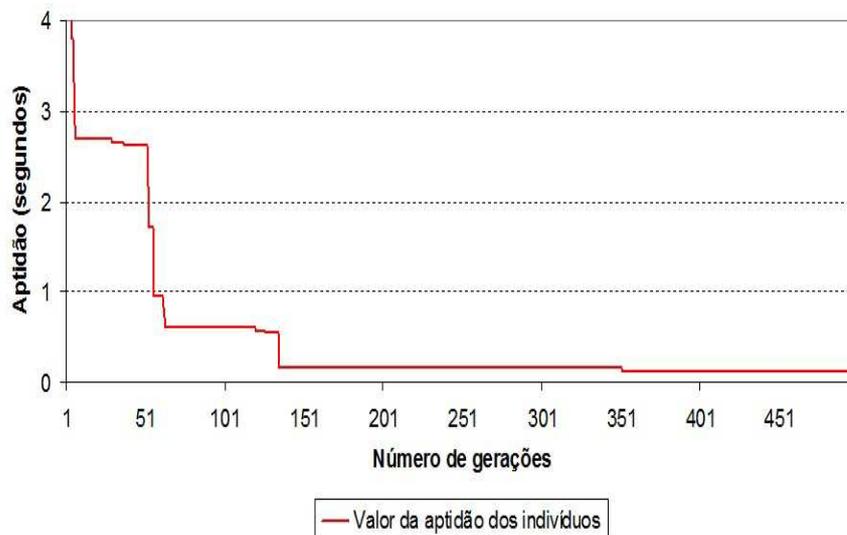


Figura 4.2: Evolução dos melhores indivíduos gerados em cada interação do AG utilizando a configuração 1.

Fonte: Autoria própria.

É possível observar no gráfico apresentado na Figura 4.2, que no decorrer das interações do AG proposto, a aptidão dos indivíduos tende ao ponto ótimo apresentado neste trabalho (aptidão = 0). Com a utilização da configuração 1 o algoritmo consegue obter boas soluções a partir da interação de número 351, no entanto, como o critério de parada escolhido foi quando o número máximo de gerações fosse alcançado. O último indivíduo encontrado pelo algoritmo foi escolhido.

4.1.2. Configuração 2

Com a utilização da configuração 2 do algoritmo genético proposto neste trabalho, foi possível obter o vetor de parâmetros de sintonia do controlador PID2L com os seguintes valores: $Kp1 = 0,26$; $Ti1 = 8,20$; $Td1 = 0,16$; $Kp2 = 0,52$ e $Td2 =$



0,03. Este vetor de parâmetros retorna o valor $t_s \text{ degrau} = 10,10$ segundos e um tempo $t_s \text{ rampa} = 9,63$ segundos. A aptidão referente ao melhor indivíduo encontrado pelo AG nesta configuração foi 0,23 segundos. A Figura 4.3 mostra a evolução dos melhores indivíduos encontrados pelo AG após as 500 interações.

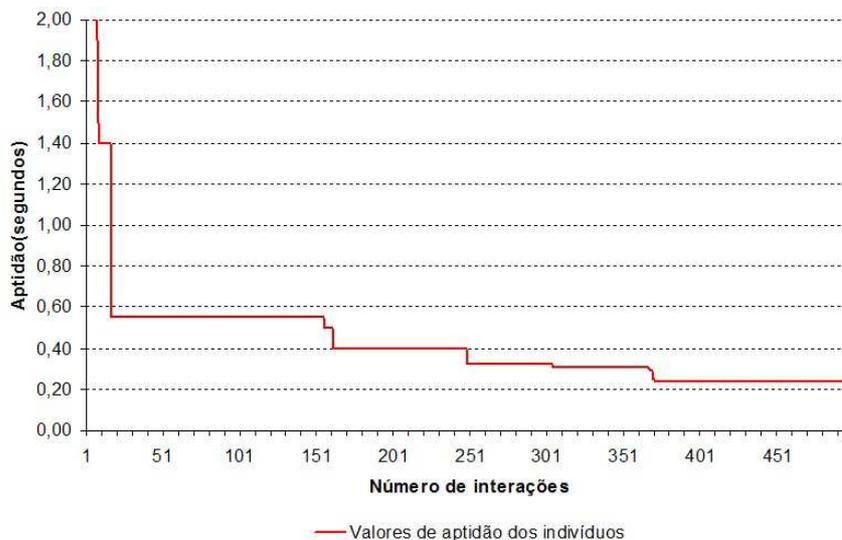


Figura 4.3: Evolução dos melhores indivíduos encontrados pelo algoritmo genético com a utilização da configuração 2.

Fonte: Aurotia própria.

Com a utilização da configuração 2 no AG proposto, o operador de *crossover* foi alterado para dois pontos de corte no cromossomo. Com o *crossover* de dois pontos, o AG conseguiu atingir a região de soluções ótimas em menos gerações se comparado ao AG da configuração 1. Observando a Figura 4.3, também é possível verificar que a configuração 2 do AG apresenta menores intervalos entre as interações sem que ocorra uma evolução de indivíduos em direção ao ponto perfeito (aptidão = 0).



4.1.3. Configuração 3

A configuração 3 do AG proposto retornou um vetor de parâmetros com os seguintes valores: $Kp1 = 2,33$; $Ti1 = 4,97$; $Td1 = 0,08$; $Kp2 = 4,26$ e $Td2 = 0,00$. Nesta configuração, a função *fitness_degrau* apresentou um t_s *degrau* = 9,97 segundos e a função *fitness_rampa*, um t_s *rampa* = 11,78 segundos. Com a utilização destes valores na função de aptidão, foi possível obter um *fitness* = 0,91 segundos. A Figura 4.4 pode ser utilizada para verificar a evolução das melhores soluções encontradas pela configuração 3 do AG.

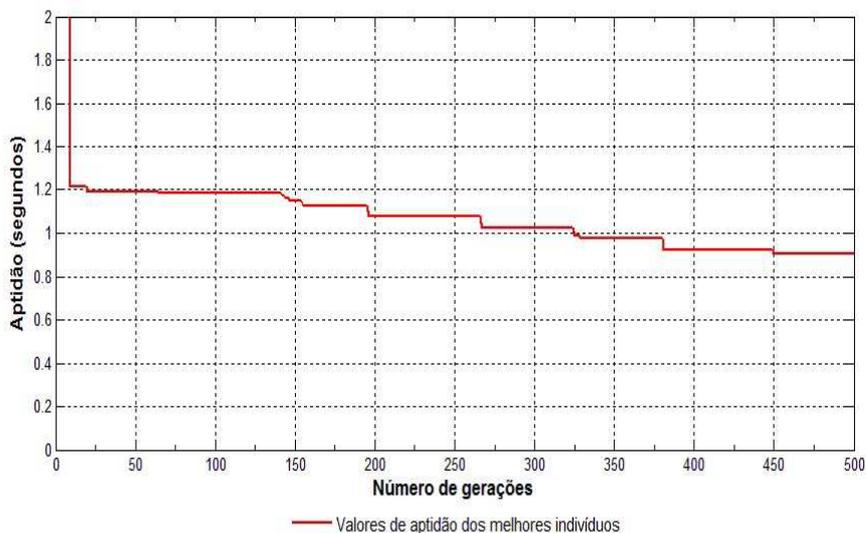


Figura 4.4: Evolução da aptidão dos melhores indivíduos encontrados durante as interações do AG utilizando a configuração 3.

Fonte: Aurotia própria.

Através da Figura 4.4 é possível observar que a configuração 3 do AG alcança a região de soluções ótimas numa interação anterior as configurações utilizadas. O uso do método de seleção por torneio nesta configuração ajuda o algoritmo genético



a manter a transferência das características das melhores soluções da geração atual para a próxima. No entanto, esta configuração não retornou uma solução melhor que as utilizadas anteriormente, isto pode estar relacionado ao fato do *crossover* de um ponto transmitir padrões dos indivíduos da geração atual para a próxima geração de forma menos intensa que o *crossover* de dois pontos (LINDEN, 2012).

4.1.4. Configuração 4

Com o AG da configuração 4, os valores encontrados que compõem o vetor de parâmetros do controlador foram: $Kp1 = 0,00$; $Ti1 = 9,37$; $Td1 = 0,33$; $Kp2 = 0,82$ e $Td2 = 0$. O valor da função *fitness_degrau* obtido com a configuração 4 do AG foi $t_s\text{ degrau} = 10,00$ segundos e o valor retornado pela função *fitness_rampa* foi $t_s\text{ rampa} = 9,97$ segundos. Estes valores, quando inseridos na equação (3.2), resultam em uma aptidão de 0,01 segundos. A evolução das melhores soluções encontradas pelo AG da configuração 4 pode ser observada na Figura 4.5.

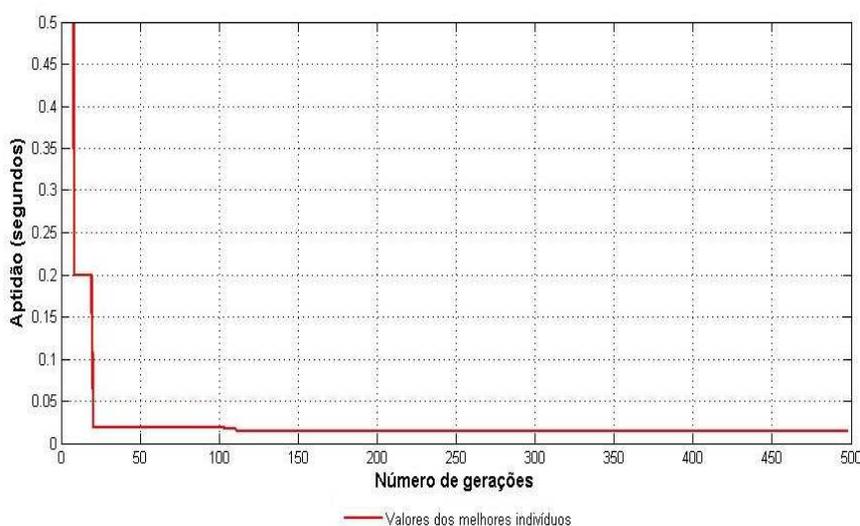


Figura 4.5: Evolução das melhores soluções encontradas durante a execução do AG utilizando a configuração 4.

Fonte: Aurotia própria.

Na Figura 4.5 é possível verificar que a configuração 4 alcançou uma região de soluções próximas da perfeita em um número de gerações reduzido (geração 21). No entanto, a partir da geração 112 o algoritmo convergiu para uma região onde não houve melhoria nos valores da aptidão dos indivíduos. O aumento no desempenho da configuração 4, pode ser justificado pelo uso em conjunto do método de seleção por torneio e do *crossover* de dois pontos. Com isso, a pressão seletiva que o método exerce sobre a população para que as características dos melhores indivíduos sejam transmitidas às próximas gerações, torna-se maior do que nas outras configurações (LINDEN, 2012).



5. Conclusão

Este trabalho apresentou um processo de sintonia de um controlador Proporcional Integral e Derivativo com 2 graus de Liberdade (PID2L) utilizando algoritmo genético (AG). Com intuito de obter um resultado mais aprimorado, foram propostas quatro configurações distintas no algoritmo genético que variaram os métodos de seleção e os pontos de *crossover*. Constatou-se que a configuração 4 foi a melhor entre as demais com o $t_s \text{ degrau} = 10,00$ segundos e o $t_s \text{ rampa} = 9,97$ segundos, visto que, o tempo de acomodação ideal é de 10,00 segundos com uma variação permitida de 20%.

Como sugestões de trabalhos futuros, podem-se seguir duas vertentes. Na primeira, propor novas configurações para esse AG. Na segunda, usar outra heurística, como por exemplo, a GRASP. Após, realizar comparações entre o tempo de acomodação da sintonia do controlador PID2L.

Referências

ALFARO, V. M.; VILANOVA, R. **Robust tuning of 2DoF PID controllers with filter for unstable first-order plus dead-time processes**IEEE, set. 2013Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6648035>>. Acesso em: 11 fev. 2015

ALFARO, V. M.; VILANOVA, R.; ARRIETA, O. **Two-Degree-of-Freedom PI/PID tuning approach for smooth control on cascade control systems**IEEE, 2008Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4738796>>. Acesso em: 11 fev. 2015

ANNEL. **Resolução Normativa nº 414: Condições Gerais de Forneciemtno de Energia Elétrica**Publicação de Agência Nacional de Energia Eletrônica (ANNEL), , 2010. Disponível em:



<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2015

ARAKI, M.; TAGUCHI, H. Two-degree-of-freedom PID controllers. **International Journal of Control, Automation, and Systems**, v. 1, n. 4, p. 401 à 411, 2003.

BAYINDIR, R. et al. **PID controlled synchronous motor for power factor correction**IEEE, mar. 2009Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4915214>>. Acesso em: 11 fev. 2015

ÇOLAK, I.; BAYINDIR, R.; BAY, Ö. . Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 13, p. 2189–2204, ago. 2003.

DONG HWA KIM. **Tuning of 2-DOF PID controller by immune algorithm**IEEE, 2002Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1007007>>. Acesso em: 11 fev. 2015

DONG HWA KIM. **Nuclear steam generator level control by a neural network-tuning 2-DOF PID controller**IEEE, 2004Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1397256>>. Acesso em: 11 fev. 2015

DOS SANTOS COELHO, L. Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 39, n. 4, p. 1504–1514, fev. 2009.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S/A, 2008.

HERREROS, A.; BAEYENS, E.; PERÁN, J. R. Design of PID-type controllers using multiobjective genetic algorithms. **ISA Transactions**, v. 41, n. 4, p. 457–472, out. 2002.

HUANG, W.; LAM, H. N. Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems. **Energy and Buildings**, v. 26, n. 3, p. 277–282, jan. 1997.

KAHRAMAN, H. T.; BAYINDIR, R.; SAGIROGLU, S. A new approach to predict the excitation current and parameter weightings of synchronous machines based on



genetic algorithm-based k-NN estimator. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 129–138, dez. 2012.

KUMAR, V.; GAUR, P.; MITTAL, A. P. ANN based self tuned PID like adaptive controller design for high performance PMSM position control. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 17, p. 7995–8002, dez. 2014.

LINDEN, R. **Algoritmo Genético**. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: Ciência Moderna, 2012.

MARKUS, O. **Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada, teoria e exercícios**. São Paulo: Editora Érica, 2011.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo (SP): Pearson Prentice Hall, 2011.

PREITL, S. et al. **Tuning of 2-DOF fuzzy PI(D) controllers. Laboratory applications**IEEE, nov. 2010Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5672242>>. Acesso em: 11 fev. 2015

SAGIROGLU, S.; ÇOLAK, I.; BAYINDIR, R. Power factor correction technique based on artificial neural networks. **Energy Conversion and Management**, v. 47, n. 18-19, p. 3204–3215, nov. 2006.

SHU-QIU, G. et al. **Research of PMSM controller based on 2DOF-PID algorithm**ICEMS. **Anais...** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON. Seoul - South Korea: IEEE, 2007

ZHANG, J. et al. Self-organizing genetic algorithm based tuning of PID controllers. **Information Sciences**, v. 179, n. 7, p. 1007–1018, mar. 2009.