

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0400-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.002221708>

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro electricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de subáreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

APLICAÇÃO DO NÍOBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Claudinei Guilherme Hoffmann

Luciana Paro Scarin Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217081>

CAPÍTULO 2..... 14

FORECAST METHOD FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES: A CASE STUDY OF THE ONTARIO'S ELECTRICAL SYSTEM

Bruno Knevez Hammerschmitt

Felipe Cirolini Lucchese

Marcelo Bruno Capeletti

Renato Grethe Negri

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217082>

CAPÍTULO 3..... 28

IDENTIFICADOR DE FALHAS PARA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BASEADO EM SUPPORT VECTOR MACHINE IMPLEMENTADO EM CLOUD

Jacyeude de Moraes Passos Araujo Segundo

Carlos Vinicius Alves Coimbra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217083>

CAPÍTULO 4..... 41

DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES

Ivan Nunes da Silva

Beatriz de Lima Tavares

Sofia Moreira de Andrade Lopes

Danilo Hernane Spatti

Rogério Andrade Flauzino

Victor Hideki Yoshizumi

Ana Cláudia Carvalho Barquete

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217084>

CAPÍTULO 5..... 56

LEITURA DE PARÂMENTOS DE MOVIMENTO DE UM PÊNDULO RÍGIDO CONTÍNUO UTILIZANDO SENSOR DE EFEITO HALL

Getúlio Teruo Tateoki

Jackson Tsukada

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217085>

CAPÍTULO 6.....	65
PANELES FOTOVOLTAICOS ADICIONALES A COLECTORES PARABÓLICOS PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR EN ZONAS TROPICALES	
Rosenberg J Romero	
Yuridiana Rocio Galindo Luna	
Jesús Cerezo Román	
Moisés Montiel González	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217086	
CAPÍTULO 7.....	94
UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR	
Luis B. P. Nascimento	
Vandilberto P. Pinto	
Márcio A. B. Amora	
Rômulo N. C. Almeida	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217087	
CAPÍTULO 8.....	108
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON	
Bruno Suracci de Lima	
Flávio Luiz Rossini	
João Henrique Dias Corrêa	
João Marcos Pericaro Lopes	
Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa	
Yuri Ruzzene Barroso	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088	
CAPÍTULO 9.....	126
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH ₂) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER	
Juarez Corrêa Furtado Júnior	
Ennio Peres da Silva	
Vitor Feitosa Riedel	
Ana Beatriz Barros Souza	
Hélio Nunes de Souza Filho	
Demóstenes Barbosa da Silva	
Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa	
Thiago Dias Alencar Ferreira	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217089	
SOBRE OS ORGANIZADORES	138
ÍNDICE REMISSIVO.....	139

UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR

Data de aceite: 01/08/2022

Luis B. P. Nascimento

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Vandilberto P. Pinto

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Márcio A. B. Amora

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

Rômulo N. C. Almeida

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral Sobral – Ceará

ABSTRACT: This article presents the application of the Harmony Search Algorithm and a hybrid version of Harmonica Search Algorithm with Particle Swarm Optimization to the automatic weighting of matrices of Linear Quadratic Regulator. This controller has excellent properties of robust stability, however, the implementation this one has a related difficulty defining two weighting matrices Q and R . A Harmony Search Algorithm was implemented and applied in the

search of the weighting matrices. In order to obtain a better performance, a implementation of Particle Swarm Optimization was used to provide a self-adaptation in one of the Harmonic Search parameters. When applying the search, both the standard version and the hybrid version showed good results, however, the hybrid version produced better results in two aspects: convergence time and minimizing the evaluation function value.

KEYWORDS: Harmony Search Algorithm, Particle Swarm Optimization, Optmal Control, Linear Quadratic Regulator, Intelligent Control.

RESUMO: O presente artigo apresenta a aplicação do Algoritmo de Busca Harmônica e de uma versão híbrida de Busca Harmônica e Otimização por Enxame de Partículas na determinação otimizada das matrizes de ponderação do Regulador Linear Quadrático. Esse controlador possui excelentes propriedades de estabilidade robusta, entretanto, seu projeto possui uma dificuldade relacionada à definição de duas matrizes, Q e R . Um algoritmo de Busca Harmônica padrão foi implementado e aplicado na busca das matrizes. A fim de obter uma melhor performance, foi utilizada a técnica Otimização por Enxame de Partículas para prover uma auto-adaptação em um dos parâmetros da Busca Harmônica. Ao aplicar no problema, tanto a versão padrão quanto a versão híbrida apresentaram bons resultados, contudo, a versão híbrida obteve melhores resultados em três aspectos: Tempo de convergência, minimização do valor da função de avaliação e número de iterações.

PALAVRAS-CHAVE: Busca Harmônica, Otimização por Enxame de Partículas, Controle Ótimo, Regulador Linear Quadrático, Controle Inteligente.

1 | INTRODUÇÃO

O Regulador Linear Quadrático (*Linear Quadratic Regulator* - LQR) é uma importante técnica de controle ótimo que possui um papel primordial na teoria do controle moderno. O controlador LQR possui excelentes propriedades de estabilidade robusta, apresenta margens de ganho infinito e margens de fase com 60° , e minimiza um determinado índice de desempenho, o que garante um sistema otimizado com o menor gasto possível de energia (Maciejowski, 1989).

São constantes as pesquisas envolvendo o LQR, principalmente aplicado a complexos sistemas de controle (Bayani e Hajipour, 2013; Inumoh et al., 2014; Wei e Yao, 2015; Mazumdar et al., 2015; Rui et al., 2015; Brasel, 2015; Cheema et al., 2016; Singh e Pal, 2016).

Mesmo com inúmeras vantagens, o desempenho do LQR depende fortemente de dois componentes essenciais, suas matrizes de ponderação Q e R . Elas permitem que o controlador atenda as especificações do projeto, entretanto, tratam-se de valores com um grande espaço de busca, e definir essas matrizes pode se tornar um desafio tedioso e complexo, comprometendo os prazos definidos no projeto por conta da paralisa gerada (Gbaupe, 1972; Stein, 1979; Medanic, Tharp e Perkins, 1988). Visando minimizar os percalços causados por essa problemática, vem se consolidando o uso de diversos algoritmos de Inteligência Computacional (IC) para otimizar essa busca, tais como Algoritmo Genético (Gupta e Tripathi, 2014), Recozimento Simulado (Jaleel e Francis, 2013), entre outros.

A técnica Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) tem sido aplicada em diversos trabalhos, entretanto, sua forma padrão apresenta problemas de convergência prematura (Nezami, Bahrampour e Jamshidlou, 2013), o que não é favorável a um problema com variáveis de decisão fortemente acopladas.

Um método de busca que vem ganhando destaque nos últimos anos devido a sua facilidade de implementação e capacidade de identificar regiões de alto desempenho dentro do espaço de busca em um tempo razoável é o Algoritmo de Busca Harmônica (*Harmony Search* - HS), uma nova meta-heurística baseada em conceitos musicais de improvisação (Geem, Kim e Loganathan, 2001), que tem sido aplicada nos mais diversos problemas (Manjarres *et al.*, 2013), inclusive na determinação das matrizes Q e R , proposta apresentada por (Nascimento *et al.*, 2015a; 2015b).

O presente trabalho apresenta a aplicação do algoritmo de Busca Harmônica na determinação das melhores matrizes Q e R do controlador LQR. A fim de impulsionar o poder de otimização do HS, o PSO foi aplicado na adaptação automática de um de seus

parâmetros.

As próximas seções deste artigo estarão organizadas da seguinte maneira: na seção 2 serão abordados os conceitos que envolvem o algoritmo HS. A seção 3 abordará uma introdução ao PSO. Na seção 4 será apresentado o Regulador Linear Quadrático e na seção 5 será apresentado o como foi projetado o algoritmo HS+PSO aplicados ao LQR. A seção 6 mostrará os resultados das simulações, assim como a planta utilizada como teste e por fim, na seção 7, serão expostas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

2 | ALGORITMO DE BUSCA HARMÔNICA

A Busca Harmônica (Geem, Kim e Loganathan, 2001), é uma meta-heurística de otimização baseada em população que foi inspirada no processo de improvisação musical onde os músicos tentam buscar as notas que melhor compõem uma harmonia perfeita.

Uma comparação entre o processo de improvisação musical e um problema de otimização é feito em (Geem, 2010), onde um trio de Jazz procura realizar uma composição através de um improviso. O saxofonista, o baixista e o guitarrista compõem as variáveis de decisão do problema; as notas tocadas nos instrumentos representam os intervalos de valores de cada variável; as combinações das notas representam as possíveis soluções e o ato de apreciação dos ouvintes representa a função de avaliação ou função objetivo do problema, como é mostrado na Figura 1.



Figura 1 – Comparação entre o processo de improvisação musical e otimização

O HS padrão pode ser descrito em cinco passos:

1. Inicialização dos parâmetros.
2. Inicialização da Memória Harmônica
3. Improviso de uma nova harmonia;
4. Atualização da Memória Harmônica;
5. Verificação do critério de parada.

Os parâmetros são o tamanho da memória harmônica (*Harmony Memory Size* - HMS), taxa de consideração da memória harmônica (*Harmony Memory Consideration Rate* - HMCR), taxa de ajuste dos valores (*Pitch Adjustment Rate* - PAR), largura de banda (*BeWidth* - BW) e número de máximo de improvisações (*Number of improvisations* - NI).

O HS possui o mesmo conceito dos algoritmos evolucionários sobre geração randômica de população. A Memória Harmônica (HM) possui um conjunto de HMS harmonias,

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_n^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde, x é uma variável de decisão do vetor de harmonia, n é o número de variáveis utilizadas para encontrar o valor da função de avaliação f do problema.

A cada iteração do algoritmo é gerada um novo vetor de harmonia, $x'=(x'_1, x'_2, \dots, x'_N)$, que corresponde a uma solução candidata. Cada elemento x é obtido a partir de harmonias contidas na HM, selecionadas por uma probabilidade de HMCR:

$$x'_i = \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, \dots, x_i^{HMS}\} & P = \text{HMCR} \\ x'_i \in X_i & P = (1 - \text{HMCR}) \end{cases} \quad (2)$$

tal que X_i é um conjunto com a faixa de valores possíveis para cada variável de decisão e “ $P = \text{HMCR}$ ”, lê-se probabilidade de HMCR.

Cada componente obtido é testado para determinar se deve ser ajustado. Esse ajuste é dado com base em BW e com probabilidade de PAR:

$$x'_i = x'_i \pm r \times BW, \quad r \in (0,1) \quad (3)$$

Se o vetor gerado for melhor que a pior harmonia da HM, a pior é substituída. O algoritmo encerra de acordo com um critério, que pode ser o número de iterações ou se a harmonia gerada atende aos critérios do problema.

3 | OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

O PSO (Kennedy e Eberhart, 1995) é uma técnica de otimização estocástica baseada em população e inspirada no comportamento de animais como voo de pássaros,

abelhas, nado de cardume de peixes, entre outros.

Nesse método é criado um conjunto de partículas que correspondem às possíveis soluções. Cada partícula possui seu vetor de velocidade, ambos inicializados aleatoriamente. Após inicializadas, as partículas são avaliadas.

O algoritmo considera a melhor posição de cada partícula e uma melhor posição global. A cada iteração do algoritmo, é calculada a velocidade das partículas (4) e suas novas posições (5).

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1(p_i - x_i(t))r_1 + c_2(g - x_i(t))r_2 \quad (4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (5)$$

Nas equações da velocidade (4) e do movimento (5), t e $t+1$ representam duas sucessivas iterações, v_i é o vetor de velocidade da partícula x_i . p_i é chamado de *personal best* de uma partícula, que corresponde à melhor posição de uma determinada partícula, enquanto g , *global best*, é a melhor posição que já foi ocupada por alguma partícula. As constantes c_1 e c_2 são valores reais, usualmente $0 \leq c_1, c_2 \leq 4$ e r_1 e $r_2 \in (0,1)$.

4 | REGULADOR LINEAR QUADRÁTICO

O LQR é um controlador ótimo com excelentes características de desempenho e de implementação, que garante a estabilidade frente a pequenas perturbações. Considere a equação linear invariante no tempo:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (6)$$

Esse controlador objetiva encontrar o vetor de controle ótimo que minimize a função de custo (7), representado pelo índice de desempenho quadrático J , que harmoniza a eficácia da regulação com o uso do vetor de controle.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt \quad (7)$$

Em (6) tem-se A , B , C e D , matrizes relacionadas ao modelo do sistema para a variável de estado $x(t)$, e a variável de controle $u(t)$, respectivamente. Em (7), Q , uma matriz semidefinida positiva ($Q \geq 0$) e R , uma matriz positiva definida ($R > 0$). O LQR permite determinar uma matriz K de ganho ótimo através da lei de controle:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (8)$$

sendo

$$K = R^{-1}B^T P \quad (9)$$

A matriz P é determinada a partir da resolução da Equação Algébrica de Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (10)$$

A partir dos ganhos obtidos com a matriz aumentada (Ogata, 2011), pode-se obter o ganho integral (K_i), definido por $K = [K_r, K_i]$. Os ganhos K_r e K_i podem ser aplicados ao sistema linear de controle, por meio do modelo matricial dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_r & BK_i \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r(t) \quad (11)$$

5 | MODELAGEM DO LQR OTIMIZADO

5.1 Busca Harmônica

5.1.1 Codificação da Harmonia

A fim de simplificar a implementação do algoritmo, utilizou-se a abordagem empregada por (Bryson e Ho, 1975), onde considerou-se os valores diagonais das matrizes Q e R , ou seja, $Q = \text{diag}([Q_1, Q_2, \dots, Q_{nA}])$ e $R = \text{diag}([R_1, \dots, R_{nB}])$, sendo nA a ordem do sistema e nB o número de entradas.

Dessa forma, o vetor de harmonia é dado por:

$$QR_i = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{nA}, R_1, \dots, R_{nB}] \quad (12)$$

5.1.2 Função de Avaliação

Para esse problema, o HS deve minimizar o erro correspondente ao somatório do módulo dos resíduos gerados entre os valores dos parâmetros definidos nos critérios de projeto, dessa forma, cada harmonia receberá um valor de erro correspondente, definido por:

$$f(QR_i) = |Tr - Tr_i| + |Ts - Ts_i| + |Mp - Mp_i| + |Es - Es_i| \quad (13)$$

Os parâmetros da função (13) representam o tempo de subida (*Rise Time* – Tr), tempo de regime estacionário (*Settling Time* – Ts), sobressinal (*Maximum Peak* – Mp) e erro em regime estacionário (Es).

5.1.3 Tratamento do Parâmetro PAR

Para o propósito do LQR, considerou-se um vetor PAR, contendo os parâmetros para cada variável de decisão.

$$PAR_i = [PAR_1, PAR_2, \dots, PAR_{QR_n}] \quad (14)$$

5.2 Otimização por Enxame de Partículas

Foi implementado um algoritmo PSO para determinar os melhores parâmetros de ajuste para o Algoritmo HS. As partículas do PSO são definidas na Equação (14), e a função de avaliação das partículas é a mesma do HS, Equação (13).

6 I RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A fim de testar a eficácia dos algoritmos, foi considerado o modelo linear do helicóptero Chinook CH-47 (Doyle e Stein, 1981), buscando controlar duas medias: velocidade vertical (V_z) e ângulo de arfagem (θ).

$$A = \begin{bmatrix} -0,02 & 0,005 & 2,4 & -32 \\ -0,14 & 0,44 & -1,3 & -30 \\ 0 & 0,018 & -1,6 & 1,2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x \quad B = \begin{bmatrix} 0,14 & -0,12 \\ 0,36 & -8,6 \\ 0,35 & 0,009 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0,3048 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 57,3 \end{bmatrix} x$$

Os polos do sistema em malha aberta são $\{-2,2279 \ 0,0652 \ 0,4913 \pm 0,4151j\}$. De acordo com os critérios adotados em (Hartmann, Stein e Pratt, 1979), os valores tomados como base para os parâmetros de resposta transitória estão descritos na Tabela 1.

Saída	Tr	Ts	Mp
θ	1,5	4,0	1,05
V_z	2,0	4,0	0

Tabela 1. Especificações do projeto CH-47.

Foi aplicado no problema um algoritmo de Busca Harmônica padrão e a Busca Harmônica híbrida com Otimização por Enxame de Partículas (HSPSO) para fins de comparação. Os parâmetros utilizados nos algoritmos são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

HMCR	BW	HMS	NI	PAR
0,9	30	50	1000	0,8

Tabela 2. Parâmetros do HS.

Nº Partículas	C1	C2
20	2	2

Tabela 3. Parâmetros do PSO.

O critério de parada utilizado no algoritmo foi o número de iterações = 1000, assim

foi possível avaliar o algoritmo pela velocidade da convergência.

6.1 Resultados com Busca Harmônica

O HS obteve bons resultados, e com uma performance razoavelmente eficaz, foi capaz de otimizar a busca das matrizes Q e R , obtendo $Q=\text{diag}([0,0045 \ 0,5066 \ 1,6449 \ 0,6632 \ 4,2762 \ 1,2132])$ e $R=\text{diag}([7,2699 \ 0,0512])$.

A Figura 2 apresenta uma simulação com a aplicação do HS e a Figura 3 apresenta o gráfico de convergência dessa simulação.

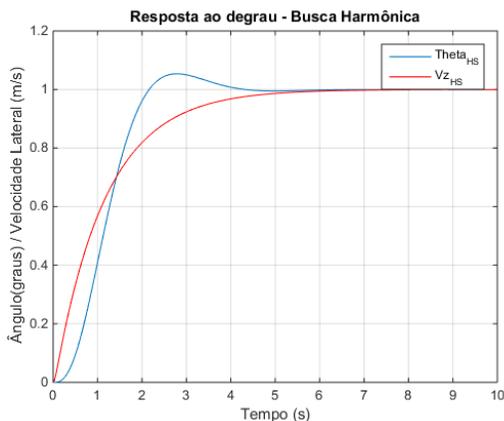


Figura 2 – Resposta do sistema ao degrau unitário.

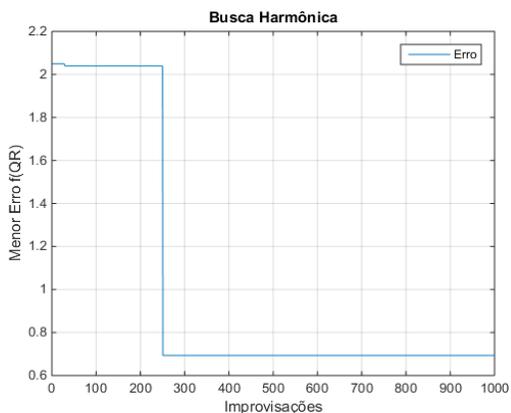


Figura 3 – Gráfico da convergência do algoritmo. Decaimento da função de avaliação do HS.

A Tabela 4 apresenta os valores obtidos na simulação com o algoritmo HS.

Menor Erro f(QR)	Tempo (s)	Nº de Iterações
0,6934	34,3587	1000

Tabela 4. Análise da Convergência com HS.

Pode ser observado na Figura 2 que, na simulação obtida com o algoritmo HS, o sistema foi controlado, com poucos segundos para estabilização em ambas as saídas. O resultado do controle foi satisfatório, tendo em vista que o esperado para esse sistema é um comportamento próximo ao apresentado.

A Figura 3 e a Tabela 4 apresentam informações relacionadas à convergência do algoritmo HS na busca das matrizes Q e R . O algoritmo, embora atendendo as necessidades do problema, não apresentou uma convergência com um custo baixo.

6.2 Resultados com Busca Harmônica e PSO

O HPSO obteve ótimos resultados, e com uma performance eficaz, sendo capaz de otimizar a busca das matrizes Q e R , obtendo $Q = \text{diag}([0,0003 \ 0,0948 \ 8,5310 \ 2,0605 \ 1,4284 \ 0,8196])$ e $R = \text{diag}([0,7130 \ 1,6954])$. A Figura 4 mostra uma simulação com a aplicação do HPSO e a Figura 5 apresenta o gráfico de convergência dessa simulação.

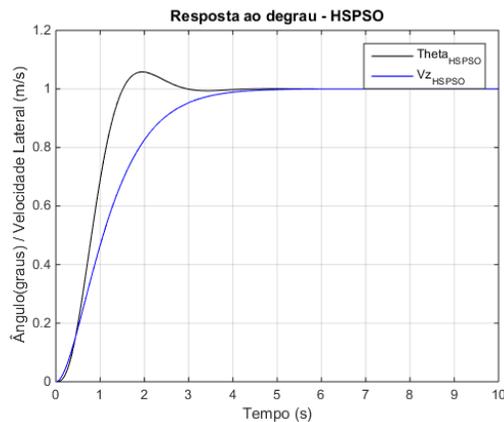


Figura 4 – Resposta do sistema ao degrau unitário.

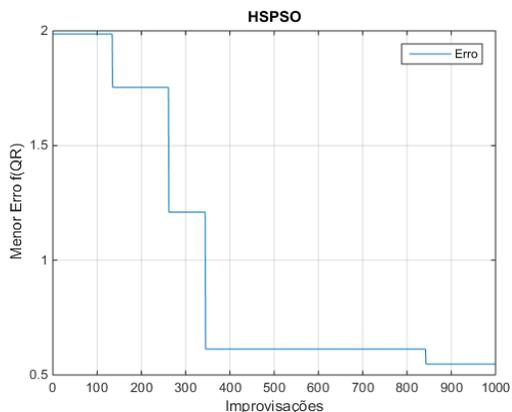


Figura 5 – Gráfico da convergência do algoritmo. Decaimento da função de avaliação do HSPSO.

Na Tabela 5 são mostrados os valores referentes ao gráfico de convergência da simulação com HSPSO.

Menor Erro f(QR)	Tempo (s)	Nº de Iterações
0,5474	26,2188	1000

Tabela 5. Análise da Convergência com HSPSO

Pode ser observado na Figura 4 que, na simulação obtida com o algoritmo HSPSO, o resultado do controle foi satisfatório, tendo em vista que o esperado para esse sistema era um comportamento próximo ao apresentado. O algoritmo, além de ter atendido aos critérios do projeto de controle, obteve convergência em cerca de 30 segundos e com um erro aceitável para esse problema. A Tabela 6 mostra as variáveis relacionadas à resposta transitória das simulações. Esses parâmetros estão presentes na equação (13).

	Saída	Tr	Ts	Mp
HS	Θ	1,3061	3,6913	1,0537
	Vz	2,5284	4,5280	0,9998
HSPSO	Θ	0,9163	2,5841	1,0583
	Vz	2,0952	3,6075	1.0000

Tabela 6. Análise da Saída em Regime Transitório

As Figuras 6 e 7 apresentam uma comparação entre as respostas em regime transitório. As imagens foram plotadas, separadas por saídas.

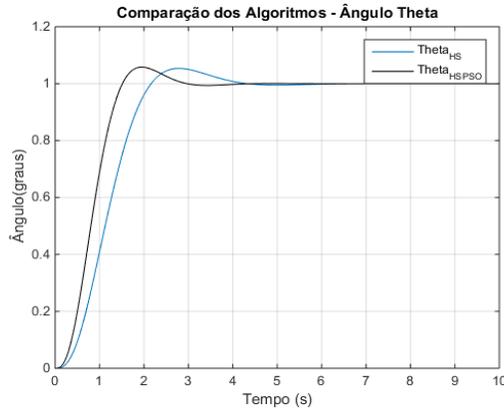


Figura 6 – Resposta dos sistemas ao degrau do Ângulo Theta.

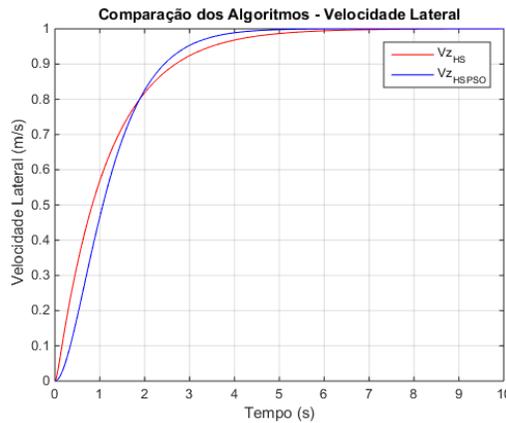


Figura 7 – Resposta dos sistemas ao degrau para a Velocidade Vertical.

Através dos dados apresentados na Tabela 6, é possível afirmar que a simulação realizada com o HSPSO apresentou melhor desempenho em comparação com a simulação através de HS. Embora possuam valores aproximados, a simulação com a técnica híbrida claramente se mostrou superior, uma vez que os resultados do HSPSO se aproximam mais dos valores apresentados na Tabela 1.

Devido a natureza estocástica do algoritmo de HS, principalmente pela Memória Harmônica gerada de maneira aleatória, cada execução apresenta resultados distintos. Dessa forma, os algoritmos foram submetidos a uma série de 30 execuções. Os valores médios estão presentes na Tabela 7.

Algoritmo	Erro Médio f(QR)	Desvio Padrão f(QR)	Tempo Médio (s)
HS	0,6068	0,0557	34,6843
HSPSO	0,4030	0,0192	23,0780

Tabela 7. Análise da Convergência com HSPSO

Pode-se observar na sumarização de resultados apresentados na Tabela 7, que os algoritmos obtiveram valores aproximados. Embora aceitável, o HS apresentou pior um resultado, provavelmente por conta da definição empírica dos parâmetros. Já com a versão híbrida apresentada neste trabalho, houve uma melhora considerável nos resultados, em comparação com o HS.

Devido ao número de iterações do algoritmo, o tempo médio excedeu 20 segundos, entretanto, é importante considerar que a cada passo do algoritmo o sistema é simulado HMS vezes, para a obtenção dos parâmetros de resposta transitória e do erro em regime permanente.

7 | CONCLUSÃO

A presente pesquisa apresentou uma implementação do Algoritmo de Busca Harmônica com o parâmetro PAR definido de maneira adaptativa por meio de Otimização por Enxame de Partículas, aplicado na determinação das matrizes de ponderação do Regulador Linear Quadrático.

Pôde-se confirmar que a busca das matrizes Q e R pode ser tratado como um problema de otimização, por conta da minimização do erro gerado entre os índices de desempenho do sistema. Foi testada a versão padrão do HS e o HSPSO, versão híbrida proposta. Constatou-se que, embora ambos algoritmos apresentaram bons resultados, o HSPSO se mostrou melhor em tempo de execução e convergência.

Com base no exposto, é possível afirmar que a hibridização dos algoritmos HS e PSO se tornou uma alternativa à busca automática das matrizes Q e R do LQR, e para problemas em geral, com a minimização dos esforços na definição de parâmetros por meios empíricos.

Preende-se como trabalho futuro implementar a abordagem robusta do controlador LQR, utilizando o Algoritmo de Busca Harmônica como meio de otimização dos processos empíricos de determinação de matrizes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo fomento à pesquisa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- Bayani, H. and Hajipour, J. (2013). On the design of an autopilot for roll motion in an airplane using LQR and flexible dynamic model. The 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation.
- Brasel, M. (2015). A gain-scheduled multivariable LQR controller for hybrid excitation synchronous machine. 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics.
- Bryson, A. and Ho, Y. (1975). *Applied optimal control*. Washington: Hemisphere Pub. Corp.
- Cheema, M., Fletcher, J., Xiao, D. e Rahman, M. (2016). A Linear Quadratic Regulator-Based Optimal Direct Thrust Force Control of Linear Permanent-Magnet Synchronous Motor. IEEE
- Doyle, J. e Stein, G. (1981). Multivariable feedback design: Concepts for a classical/modern synthesis. IEEE Transactions on Automatic Control, 26(1), pp.4-16.
- Gbaupe, D. (1972). Derivation of weighting matrices towards satisfying eigenvalue requirements. International Journal of Control, 16(5), pp.881-888.
- Geem, Z. (2010). Recent advances in harmony search algorithm. Berlin: Springer-Verlag.
- Geem, Z., Kim, J. e Loganathan, G. (2001). A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. SIMULATION, 76(2), pp.60-68.
- Gupta, S. e Tripathi, R. (2014). Improved performance of LQR controller in CSC based STATCOM using genetic optimization. 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON).
- Hartmann, G., Stein, G. e Pratt, S. (1979). Digital adaptive controllers for VTOL vehicles. NASA Contractor Report., 1.
- Inumoh, L., Horri, N., Forshaw, J. e Pechev, A. (2014). Bounded gain-scheduled LQR satellite control using a tilted wheel. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 50(3), pp.1726-1738.
- Jaleel, J. e Francis, R. (2013). Simulated annealing based control of an Inverted Pendulum System. 2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC).
- Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.
- Maciejowski, J. (1989). Multivariable feedback design. Wokingham, Engle: Addison-Wesley.
- Manjarres, D., et.al. (2013). A survey on applications of the harmony search algorithm. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 26(8), pp.1818-1831.
- Mazumdar, D., Sinha, D., Panja, S. e Dhak, D. (2015). Design of LQR controller for solar tracking system. 2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer e Communication Technologies (ICECCT).
- Medanic, J., Sharp, H. e Perkins, W. (1988). Pole placement by performance criterion modification. IEEE Transactions on Automatic Control, 33(5), pp.469-472.

Nascimento, L., Pinto, V., Amora, M. e Souza, D. (2015a). Aplicação do Algoritmo de Busca Harmônica No Projeto de um Regulador Linear Quadrático Com Ação Integral. XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI).

Nascimento, L., Pinto, V., Amora, M. e Souza, D. (2015b). Busca Harmônica com ajuste adaptativo de parâmetro por meio de Algoritmo Genético aplicada na otimização do projeto LQR. XII Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional – CBIC.

Nezami, O., Bahrampour, A. e Jamshidlou, P. (2013). Dynamic Diversity Enhancement in Particle Swarm Optimization (DDEPSO) Algorithm for Preventing from Premature Convergence. *Procedia Computer Science*, 24, pp.54-65.

Ogata, K. (2011). Engenharia de controle moderno. São Paulo (SP): Pearson Prentice Hall.

Rui, W., Yi-Ming, S., Mei-Tong, L. e Hao, Z. (2015). Research on Bus Roll Stability Control Based on LQR. 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City.

Singh, A. e Pal, B. (2016). Decentralized Control of Oscillatory Dynamics in Power Systems Using an Extended LQR. *IEEE Trans. Power Syst.*, 31(3), pp.1715-1728.

Stein, G. (1979). Generalized quadratic weights for asymptotic regulator properties. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 24(4), pp.559-566.

Wei, L. e Yao, W. (2015). Design and implement of LQR controller for a self-balancing unicycle robot. 2015 IEEE International Conference on Information and Automation.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Âodos 1, 5, 7, 8

Aprendizado de máquina 28

Aprendizagem de máquinas 41, 45

Armazenamento de energia 2, 6, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 136, 137

B

Bateria 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Busca harmônica 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 105, 107

C

Cátodos 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12

Computação na nuvem 28, 36

Controle inteligente 95

Controle ótimo 95, 98

E

Electric system 14, 15, 16, 17, 25

Excedente de energia 126

F

Fontes renováveis 126, 127, 128, 131, 136, 137

H

Hidrogênio 126, 127, 128, 129, 131, 132, 134, 135, 136, 137

I

IBM Cloud 28, 29, 30, 39

Isoladores de potência 41, 42, 52

M

Máquinas de vetores de suporte 28, 31, 40, 45

Modelagem cinemática 108

Modelagem dinâmica 108, 119

Motor de indução trifásico 28, 29, 35

N

Nióbio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

O

Otimização por enxame de partículas 45, 94, 95, 97, 100, 105

P

Photovoltaic solar power 15

Power generation forecasting 15

R

Regulador linear quadrático 94, 95, 96, 98, 105, 107

Renewable energy 14, 15, 16, 20, 25, 26, 27, 92, 131, 136, 137

Robô Scara T3 401SS 108

S

Sistema de controle não linear 108

Sistemas de transmissão de energia elétrica 41

Sistemas inteligentes 29, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 51, 52

SPSS Modeler 28, 29, 30, 31, 37, 38

W

Wind power 14, 15, 17, 20, 21, 22, 24, 26

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](#) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 