



# ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO:

Docência, pesquisa e inovação tecnológica



Lilian Coelho de Freitas  
(Organizadora)



Atena  
Editora  
Ano 2023



# ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO:

Docência, pesquisa e inovação tecnológica



Lilian Coelho de Freitas  
(Organizadora)



Atena  
Editora  
Ano 2023

**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

Luiza Alves Batista

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 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  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof<sup>o</sup> 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  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof<sup>o</sup> Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

# Engenharia elétrica e de computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Flávia Roberta Barão  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadora:** Lilian Coelho de Freitas

| <b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b> |  |
|--|--|
| E57  | Engenharia elétrica e de computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica / Organizadora Lilian Coelho de Freitas. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.<br><br>Formato: PDF<br>Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader<br>Modo de acesso: World Wide Web<br>Inclui bibliografia<br>ISBN 978-65-258-0946-5<br>DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.465231601">https://doi.org/10.22533/at.ed.465231601</a><br><br>1. Energia elétrica. 2. Computação. I. Freitas, Lilian Coelho de (Organizadora). II. Título.<br><br>CDD 623.3 |
| <b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>  |  |

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

## 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.

O e-book intitulado “Engenharia elétrica e de computação: Docência, pesquisa e inovação tecnológica” está organizado em 12 capítulos e reúne importantes trabalhos científicos desenvolvido por pesquisadores de Norte a Sul do Brasil, que atuam em renomadas instituições de ensino e pesquisa.

Cada capítulo apresenta uma experiência única, com resultados práticos, consistentes e didáticos. Dessa forma, ao ler este livro, o leitor poderá aprofundar seus conhecimentos em desenvolvimento e teste de softwares, jogos digitais, aprendizagem de máquina, automação, geração de energia, entre outros assuntos relacionados à engenharia elétrica e de computação.

Além de uma base teórica aprofundada, nota-se que os autores de cada capítulo adotaram uma linguagem pedagógica e educativa. Assim, acredito que este livro é um excelente referencial teórico, especialmente para alunos de engenharia elétrica e de computação que estejam desenvolvendo trabalhos de conclusão de curso e que buscam exemplos de aplicações práticas para os conhecimentos teóricos estudados durante o curso. Através da reprodução dos resultados apresentados, é possível por exemplo propor melhorias, apresentar soluções alternativas para os problemas propostos ou desenvolver estudos comparativos. Assim o conhecimento científico avança.

Registro meus sinceros agradecimentos aos autores deste e-book, pelas significativas contribuições e pela parceria com a Atena Editora para tornar o conhecimento científico acessível de forma gratuita.

Aos nossos leitores, desejo um ótimo estudo, repleto de *insights* criativos e inovadores.

Lilian Coelho de Freitas

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>   | <b>1</b>  |
| ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA O PROCESSO DE REVISÃO EM HOMOLOGAÇÕES DE RELEASES ANDROID  |           |
| Pedro Ivo Pereira Lancellotta   |           |
| Heryck Michael dos Santos Barbosa   |           |
| João Gabriel C. Santos  |           |
| Klirssia M. Isaac Sahdo   |           |
| Janisley Oliveira De Sousa  |           |
| Abda Myrria De Albuquerque  |           |
| Roger Porty Pereira Vieira  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316011">https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316011</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>   | <b>11</b> |
| ENGENHARIA DE REQUISITOS E SUA IMPORTÂNCIA NO DESENVOLVIMENTO DE <i>SOFTWARE</i>  |           |
| Henderson Matsuura Sanches  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316012">https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316012</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>   | <b>21</b> |
| ALGORITMOS NÃO SUPERVISIONADOS E <i>WEB SCRAPING</i> PARA DESCOBERTA DE CONHECIMENTO DE CONHECIMENTO EM REDES SOCIAIS   |           |
| Carlos Daniel de Sousa Bezerra  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316013">https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316013</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b>   | <b>38</b> |
| MODELOS MENTAIS DIFUSOS PARA TOMADA DE DECISÃO SOBRE O CRESCIMENTO POPULACIONAL EM CIDADES INTELIGENTES USANDO TÉCNICAS COGNITIVAS  |           |
| Márcio Mendonça   |           |
| Caio Ferreira Nicolau   |           |
| Fabio Rodrigo Milanez   |           |
| Vicente de Lime Gonogora  |           |
| Luiz Henrique Geromel   |           |
| Marcio Aurélio Furtado Montezuma  |           |
| Rodrigo Henriques Lopes da Silva  |           |
| Marcos Antônio de Matos Laia  |           |
| Marco Antônio Ferreira Finocchio  |           |
| Renato Augusto Pereira Lima   |           |
| Edson Hideki Koroishi   |           |
| Gilberto Mitsuo Suzuki Trancolin  |           |
| André Luís Shiguemoto   |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316014">https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316014</a> |           |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b>   | <b>57</b> |
| CUSTOMIZED EXPERIENCE: DIGITAL GAMES POSSIBILITIES BEYOND   |           |

**THEIR MECHANICS**

Paula Poiet Sampedro  
 Nicholas Bruggner Grassi  
 Isabela Zamboni Moschin  
 Vânia Cristina Pires Nogueira Valente  
 Emilene Zitkus

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316015>

**CAPÍTULO 6 .....73****O USO DA AUTOMAÇÃO DIGITAL PARA AGILIZAR PROCESSOS E SUPRIMIR ERROS NA EXECUÇÃO DE ROTINAS**

Geovane Griesang  
 Pedro Henrique Giehl  
 Mateus Roberto Algayer

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316016>

**CAPÍTULO 7 .....80****HOSPITAL INTELIGENTE: UMA SIMULAÇÃO DE MONITORAMENTO DE PACIENTES UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS**

Júlia Borges Santos  
 Vinicius da Rocha Motta  
 Saymon Castro de Souza  
 Ciro Xavier Maretto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316017>

**CAPÍTULO 8 .....87****DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO NO AMBIENTE *APP DESIGNER* DO *SOFTWARE* MATLAB® PARA PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA DO ROBÔ PUMA 560**

Eber Delgado de Souza  
 Flávio Luiz Rossini  
 Luiz Fernando Pinto de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316018>

**CAPÍTULO 9 .....110****ANÁLISE DE MOTIVAÇÃO E SATISFAÇÃO NA INSTALAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS POR MEIO DE MAPAS COGNITIVOS FUZZY**

Márcio Mendonça  
 Angelo Feracin Neto  
 Carlos Alberto Paschoalino  
 Matheus Gil Bovolenta  
 Emerson Ravazzi Pires da Silva  
 Marcio Aurelio Furtado Montezuma  
 Kazuyochi Ota Junior  
 Marcos Antonio de Matos Laia  
 Augusto Alberto Foggiato  
 Vicente de Lima Gongora

Andre Luis Shiguemoto  
Francisco de Assis Scannavino Junior  
Nikolas Catib Boranelli

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.4652316019>

**CAPÍTULO 10..... 126**

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM CONTROLADOR PREDITIVO NÃO-LINEAR BASEADO EM MODELO QUASILINEAR MODIFICADO**

Manoel de Oliveira Santos Sobrinho  
Adhemar de Barros Fontes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.46523160110>

**CAPÍTULO 11 ..... 140**

**IMPLEMENTAÇÃO DE ATERRAMENTO EM UMA RESIDÊNCIA COM DR PARA ELIMINAR O CHOQUE ELÉTRICO**

Eliandro Marquetti  
Elielton Christiano de Oliveira Metz  
Luciana Paro Scarin Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.46523160111>

**CAPÍTULO 12..... 156**

**PANORAMA DAS FONTES TÉRMICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Bruno Knevez Hammerschmitt  
Felipe Cirolini Lucchese  
Marcelo Bruno Capeletti  
Renato Grethe Negri  
Leonardo Nogueira Fontoura da Silva  
André Ross Borniatti  
Fernando Guilherme Kaehler Guarda  
Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.46523160112>

**SOBRE A ORGANIZADORA ..... 171**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 172**

## DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM CONTROLADOR PREDITIVO NÃO-LINEAR BASEADO EM MODELO QUASILINEAR MODIFICADO

*Data de submissão: 18/11/2022*

*Data de aceite: 02/01/2023*

### **Manoel de Oliveira Santos Sobrinho**

Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, Colegiado de Engenharia Elétrica - CENEL  
Juazeiro - BA  
<http://lattes.cnpq.br/0858017134757716>

### **Adhemar de Barros Fontes**

Universidade Federal da Bahia - UFBA, Departamento de Engenharia Elétrica  
Salvador - BA  
<http://lattes.cnpq.br/9900321851030867>

**RESUMO:** Neste artigo desenvolve-se um controlador preditivo não-linear baseado em modelo bilinear, o qual é linearizado a cada instante de amostragem e utilizado para se efetuarem as predições. Na linearização utilizam-se os valores da saída, conhecidos em cada instante de amostragem, e valores futuros calculados a partir do modelo da planta, para se atualizarem os coeficientes do modelo preditor. Resultados de simulação são apresentados utilizando-se dois sistemas bilineares de segunda ordem, com não linearidades bastante expressivas, para se avaliar o desempenho do controlador.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle Preditivo

Não-Linear, Modelos Bilineares.

### DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A NONLINEAR PREDICTIVE CONTROLLER BASED ON MODIFIED QUASILINEAR MODEL

**ABSTRACT:** In this paper, a nonlinear predictive controller based on bilinear model is developed, which is linearized at each sampling time and it is used to perform the predictions. In the linearizations are used the output values, that are known at each sampling time, and the future values, computed from the model plant, to update the coefficients of the predictor model. Simulation results are presented using two second order bilinear systems, with significant nonlinearities, in order to evaluate the controller performance.

**KEYWORDS:** Nonlinear Predictive Control, Bilinear Models.

## 1 | INTRODUÇÃO

O controle preditivo baseado em modelo (MPC) é uma técnica de controle bastante conhecida e utilizada tanto no meio acadêmico como na indústria (Qin and Badgwell, 2003). Em plantas industriais

mais complexas é crescente a demanda pelo controle preditivo não-linear (NMPC). Isto é devido a fatores tais como: o atual nível de especificação de alta qualidade de produção; a crescente demanda de produtividade; a atual legislação ambiental, que é mais rigorosa e ainda, as exigentes considerações econômicas na indústria que levam os processos a operar mais próximos dos limites admissíveis.

Do ponto de vista conceitual o NMPC não apresenta dificuldades, já que é possível considerar a mesma função objetivo utilizada no caso linear e um modelo não linear para o cálculo das predições (Bravo et al, 2008). O que se pretende novamente é encontrar o controle que minimize a função objetivo sujeito a um conjunto de restrições. Já do ponto de vista prático, são várias as dificuldades encontradas neste problema, se comparado ao caso linear, quais sejam: a determinação do modelo do processo, quando o mesmo deve ser obtido por identificação; a obtenção do sinal de controle que requer, em geral, a solução de um problema de otimização não convexa e a análise de estabilidade e robustez da solução (Henson, 1998, Mayne et al, 2000).

Um dos métodos mais difundidos para a solução do NMPC é a utilização de modelos linearizados na predição da saída, a qual é considerada na função objetivo. Neste caso, a otimização quadrática pode ser utilizada, o que consiste na principal vantagem do método. Na literatura encontram-se diversas abordagens para esta metodologia, tais como: a utilização de múltiplos modelos lineares, que é muito explorada para o desenvolvimento do MPC robusto (Torricco e Normey-Rico, 2004; Sakizlis et al, 2005), do MPC escalonado (Lu and Arkunl, 2003) e do MPC adaptativo; o método min-max, (Wan and Kotare, 2002) e linearização a cada período de amostragem, utilizada, por exemplo, na técnica da quasilinearização (Goodhart, et al, 1994) e NEPSAC (De Keyser, 1998; Ionescu et al, 2008). Em Fontes (Fontes et al, 2002), foi desenvolvido um controlador preditivo bilinear, o qual utiliza a quasilinearização do modelo bilinear de entrada-saída e termos de compensação para minimizar os erro de predição.

A bilinearidade é um importante tipo de dinâmica não linear. Os modelos bilineares são mais simples do que os modelos não lineares genéricos e representam o comportamento do processo melhor do que os modelos lineares. Além disso, estes modelos acomodam melhor outras dinâmicas, diferentes das dinâmicas bilineares, melhor que os modelos lineares. (Fontes et al., 2002). A escolha de modelos bilineares para representar as dinâmicas de um processo é também devido ao fato que esses modelos são matematicamente mais fáceis de tratar do que os modelos não lineares genéricos e a bilinearidade está presente no comportamento dinâmico de muitos sistemas físicos (King e James, 1990). Convém observar ainda que o modelo bilinear é linear nos parâmetros, o que permite o uso de todas as técnicas de identificação de sistemas lineares, o que se constitui em uma importante vantagem deste tipo de modelo. Muitos controladores preditivos apresentados na literatura são baseados em modelos bilineares (Bloemen et al, 2001; Liu e Li, 2004; Fontes e Ângelo, 2006; Sobrinho et al, 2011; Sobrinho et al, 2012).

Neste artigo, desenvolve-se um controlador preditivo baseado em modelo bilinear, linearizado em cada instante de amostragem, e utiliza-se o algoritmo do GPC (Generalized Predictive Control), (Clark et al, 1987) para se obter a sequência de entradas de controle. A linearização utiliza valores da saída do sistema, conhecidos até o instante atual de amostragem e a resposta livre para se obterem os coeficientes do modelo linear pretendido. É importante salientar que este algoritmo é uma versão modificada do processo de quasilinearização por degrau de tempo (Goodhart, et al, 1994). No entanto, as modificações implementadas melhoram o desempenho de controle, como será mostrado pelos resultados de simulações realizadas em dois sistemas bilineares de segunda ordem, com não linearidades bastante expressivas.

## 2 I DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O modelo quasilinear por degrau de tempo (Goodhart et al, 1994), foi desenvolvido para modelos bilineares. Considere um sistema SISO (Single Input, Single Output) descrito pelo seguinte modelo bilinear:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1-d) + \sum_{i=1}^{na} \eta_{i-1} u(k-i-d)y(k-i-d), \quad (1)$$

em que:  $k$  é o instante atual de amostragem;  $A(q^{-1})$  e  $B(q^{-1})$ , são polinômios da seguinte forma:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= a_0 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na}; \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{nb} q^{-nb}, \end{aligned} \quad (2)$$

sendo:  $a_0=1$  e  $b_0 \in \mathbb{R}$ ;  $u(k)$  a sequência de entradas ou variáveis manipuladas;  $y(k)$  a sequência de saída ou variáveis controladas;  $q^{-i}$  o operador atraso tal que  $q^{-i} y(k) = y(k-i)$  e  $d \geq 0$  o atraso, expresso como múltiplos inteiros do período de amostragem. O modelo quasilinear por degrau de tempo consiste em reescrever a Equação (1) na seguinte forma:

$$y(k) = \sum_{i=1}^{na} a_i(u)y(k-i-d) + B(q^{-1})u(k-1-d), \quad (3)$$

em que:

$$a_i(u) = -a_i + \eta_{i-1} u(k-i-d). \quad (4)$$

Para se calcularem os coeficientes  $a_i(u)$  e se efetuarem as predições, que são características dos controladores preditivos, são requeridos os valores futuros das entradas  $u(k+j-1-d)$ , sendo  $j=0 \dots N_y$  e  $N_y$  o horizonte de predição. A aproximação quasilinear por degrau de tempo consiste em assumir como constante os valores futuros das entradas e iguais ao último valor conhecido da entrada,  $u(k-1)$ . Observa-se que as predições não são exatas e que o termo, utilizado para se fazer as aproximações, é constante para um

determinado instante de amostragem. Em consequência disso, tem-se uma degradação de desempenho do controlador.

Para se amenizar esta degradação e se obter uma melhor aproximação do modelo preditor, propõe-se, neste artigo, que a linearização seja realizada modificando-se os coeficientes do polinômio  $B(q^{-1})$ , diferentemente do que é feito na estratégia utilizada pela quasilinearização original, que efetua a modificação no polinômio  $A(q^{-1})$ . Para tanto, utiliza-se os valores das saídas  $y(k)$ , conhecidas até o instante atual  $k$  e os valores preditos da resposta livre,  $y_L(k+j-1-d)$ ,  $j=0\dots N_y$ , calculados em cada instante de amostragem, para se efetuar a aproximação necessária de cada predição  $j$  passos à frente,  $y(k+j-d)$ . Por simplicidade, será utilizado um modelo bilinear de segunda ordem, com  $d=0$ , para ilustrar a estratégia desta quasilinearização modificada, antes de se apresentar a sua generalização.

Seja um sistema representado pelo seguinte modelo:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) + b_0 u(k-1) + b_1 u(k-2) + \eta_0 u(k-1) y(k-1) + \eta_1 u(k-2) y(k-2). \quad (5)$$

A predição um passo à frente é dada por:

$$y(k+1) = -a_1 y(k) - a_2 y(k-1) + b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \eta_0 u(k) y(k) + \eta_1 u(k-1) y(k-1). \quad (6)$$

Para se aplicar a estratégia proposta, este modelo deve ser reescrito na seguinte forma:

$$y(k+1) = -a_1 y(k) - a_2 y(k-1) + [b_0 + \eta_0 y(k)] u(k) + [b_1 + \eta_1 y(k-1)] u(k-1). \quad (7)$$

Fazendo:

$$b_{0,1} = b_0 + \eta_0 y(k) \text{ e } b_{1,1} = b_1 + \eta_1 y(k-1), \quad (8)$$

o modelo preditor um passo à frente resulta no seguinte modelo linear:

$$y(k+1) = -a_1 y(k) - a_2 y(k-1) + b_{0,1} u(k) + b_{1,1} u(k-1). \quad (9)$$

Observa-se que  $b_{0,1}$  e  $b_{1,1}$  podem ser calculados sem necessidade de se fazer aproximações, visto que  $y(k)$  e  $y(k-1)$  são conhecidos no instante atual  $k$ , resultando em uma linearização exata para a predição um passo à frente, o que não acontece na predição um passo à frente do controlador quasilinear por degrau de tempo. Repetindo-se este procedimento para a predição dois passos à frente, tem-se que:

$$y(k+2) = -a_1 y(k+1) - a_2 y(k) + b_{0,2} u(k+1) + b_{1,2} u(k), \quad (10)$$

sendo:

$$b_{0,2} = b_0 + \eta_0 y(k+1) \text{ e } b_{1,2} = b_1 + \eta_1 y(k). \quad (11)$$

O termo  $b_{1,2}$  ainda pode ser calculado de forma exata, mas o termo  $b_{0,2}$  depende

da saída futura  $y(k+1)$ . Neste caso, será necessário se admitir uma aproximação. O termo  $y(k+1)$  será substituído pelo seu respectivo valor da resposta livre  $y_L(k+1)$ , que pode ser calculada em cada instante de amostragem. Sabe-se que o vetor de resposta livre,  $y_L(k+1) \dots y_L(k+N_y)$ , é calculada de forma recursiva e utilizando-se os valores das entradas  $u(k)$  conhecidas até o instante atual  $k$ . Assim, tem-se o modelo preditor quasilinear modificado dois passos à frente, dado por:

$$y_q(k+2) = -a_1 y(k+1) - a_2 y(k) + b_{0,2} u(k+1) + b_{1,2} u(k), \quad (12)$$

sendo:

$$b_{0,2} = b_0 + \eta_0 y_L(k+1) \text{ e } b_{1,2} = b_1 + \eta_1 y(k). \quad (13)$$

Para a predição quasilinear três passos à frente pode-se escrever:

$$y_q(k+3) = -a_1 y(k+2) - a_2 y(k+1) + b_{0,3} u(k+2) + b_{1,3} u(k+1), \quad (14)$$

sendo:

$$b_{0,3} = b_0 + \eta_0 y_L(k+2) \text{ e } b_{1,3} = b_1 + \eta_1 y_L(k+1), \quad (15)$$

em que os termos  $b_{0,3}$  e  $b_{1,3}$  são calculados por aproximação, substituindo-se  $y(k+1)$  e  $y(k+2)$  por seus respectivos valores da resposta livre  $y_L(k+1)$  e  $y_L(k+2)$ .

Para a predição  $j$  passos à frente pode-se escrever:

$$y_q(k+j) = -a_1 y(k+j-1) - a_2 y(k+j-2) + b_{0,j} u(k+j-1) + b_{1,j} u(k+j-2), \quad (16)$$

sendo:

$$b_{0,j} = b_0 + \eta_0 y_L(k+j-1) \text{ e } b_{1,j} = b_1 + \eta_1 y_L(k+j-2). \quad (17)$$

Assim, tem-se uma diferenciação do termo utilizado para se realizar a referida aproximação, para cada predição  $y(k+j)$  realizada em cada instante de amostragem  $k$ . Isto proporciona a este algoritmo uma melhor aproximação no cálculo das predições, podendo-se obter assim, um melhor desempenho do controlador. Convém salientar que quanto melhor a predição, ou seja, menor erro de predição, melhor o desempenho do controlador preditivo, cuja essência é a predição. Deve-se observar que, à medida que a saída do sistema se aproxima do valor de referência de controle, a resposta livre tende para os valores de saída do sistema. Isto lineariza de forma exata o modelo preditor no ponto de operação.

A generalização do modelo preditor, para a quasilinearização modificada, pode ser realizada escrevendo-se a Equação (1) na seguinte forma:

$$A(q^{-1})y_q(k+j) = \sum_{i=1}^{na} b_{i-1,j} u(k+j-i-d), \quad (18)$$

sendo:

$$A(q^{-1}) = a_0 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{na} q^{-na} ; \quad (19)$$

$$b_{i-1,j} = b_{i-1} + \eta_{i-1} y_L(k + j - i - d). \quad (20)$$

Assim, o modelo preditor é atualizado em cada instante de amostragem e diferenciado para cada horizonte de predição.

Observa-se que o modelo preditor obtido é linear em cada instante de amostragem. Isto permite que se utilize o algoritmo do GPC, uma vez que o mesmo foi desenvolvido para modelos lineares. Vale lembrar que a estratégia dos controladores preditivos utiliza o modelo da planta, em cada instante de amostragem, para realizar as predições.

A aproximação das predições pela resposta livre conduz, obviamente, a uma predição subótima. Contudo, deve-se observar que este é um artifício interessante, visto que na formulação da lei de controle do GPC, a minimização da função objetivo  $J$ , leva em conta a diferença entre a referência  $r$  e a resposta livre  $y_L$ , uma vez que  $J$  é dado por: (Camacho e Bordons, 2004).

$$J = \frac{1}{2} u^T G u + b^T u + f_0, \quad (21)$$

sendo:

$$\begin{aligned} G &= 2(H^T H + \lambda I) ; \\ b^T &= 2(r - y_L)^T H ; \\ f_0 &= (r - y_L)^T (r - y_L), \end{aligned} \quad (22)$$

em que  $\lambda$  é a ponderação na ação de controle. Isto mostra uma relação da aproximação realizada, que utiliza a resposta livre, com a formulação da função objetivo.

### 3 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Seja um sistema bilinear de segunda ordem descrito por:

$$\begin{aligned} y(k) &= 1,6y(k-1) - 0,63y(k-2) + 4u(k-1) + 3u(k-2) + \\ &6u(k-1)y(k-1) + 5u(k-2)y(k-2). \end{aligned} \quad (23)$$

Este sistema possui não linearidades bastante expressivas, como pode ser observado pelos valores dos coeficientes bilineares. Neste sistema, pode-se verificar a existência de grande variação no ganho estático e no tempo de estabelecimento, para níveis distintos de entradas. Além disso, o sistema apresenta um ganho estático bastante elevado. Para se efetuar o controle deste sistema hipotético, foram projetados os controladores quasilinear e quasilinear modificado conforme descrito. O Controlador

Quasilinear Modificado foi implementado com filtro de referência, ou pré-compensador, para escalonamento da referência. Isto porque, devido à sua característica de agregar os termos bilineares nos coeficientes do polinômio  $B(q^{-1})$ , o mesmo provoca sobressinal elevado, o que foi contornado com o pré-compensador.

Inicialmente, os controladores foram sintonizados de modo que seus esforços de controle ficassem próximos. Para ambos, o horizonte de previsão foi  $N_y=4$ . Em seguida, foi sintonizada a ponderação na ação de controle,  $\lambda$ , diminuindo-se o máximo possível para se obter um menor tempo de estabelecimento, mas sem instabilizar o sistema. Com isto, o esforço de controle será sempre muito grande. Para o controlador quasilinear, o menor valor possível foi  $\lambda=250$ . Para se obter um esforço de controle próximo, o controlador quasilinear modificado foi sintonizado com  $\lambda=32$ . Os resultados da simulação, aplicando-se como referência o degrau unitário, são apresentados nas Figuras 1 e 2.

Na Figura 1 observa-se um melhor desempenho do controlador quasilinear modificado, o qual reduziu em cerca de 25% o tempo de estabelecimento. Observou-se também que o controlador quasilinear tende a instabilizar com facilidade, enquanto que o controlador quasilinear modificado apresentava-se bastante estável, permitindo a redução do valor de  $\lambda$  até zero. A Figura 3 mostra o desempenho deste controlador sintonizado com  $\lambda = 10$ ,  $\lambda = 1$  e  $\lambda = 0$ .

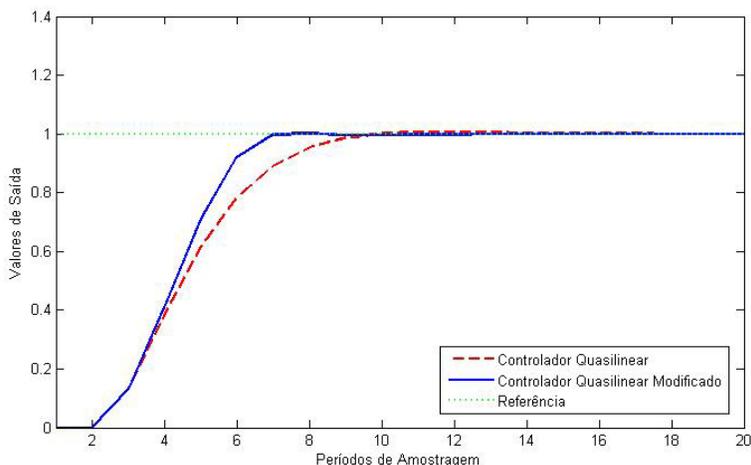


Figura 1. Saída do sistema controlado pelos controladores quasilinear e quasilinear modificado.

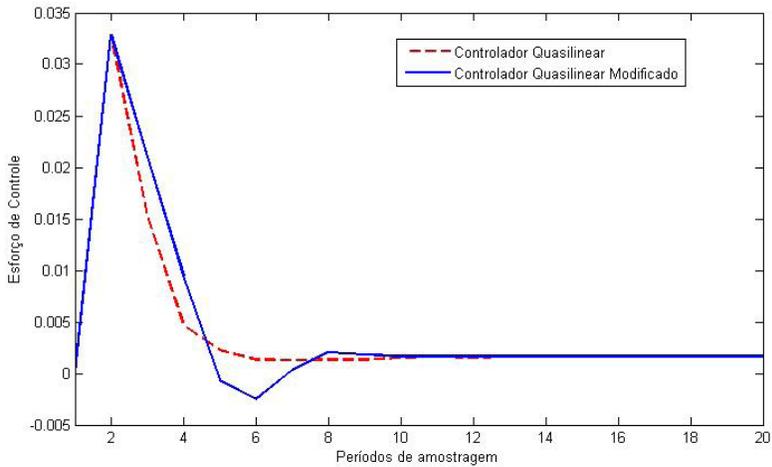


Figura 2. Esforço de controle para as saídas mostradas na Fig. 1.

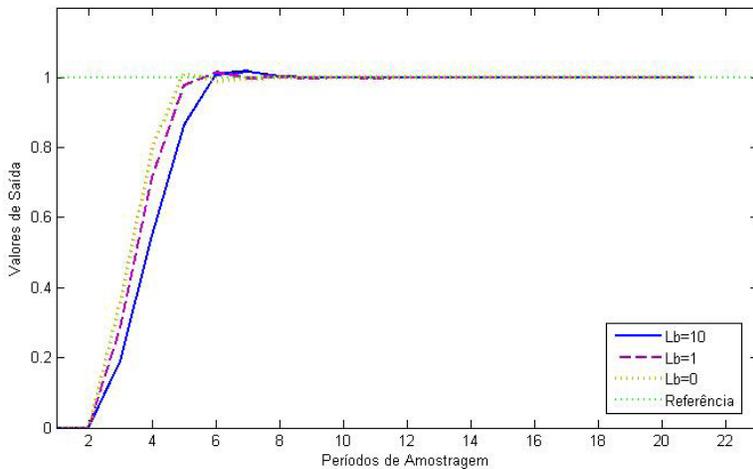


Figura 3. Saídas do sistema com o controlador quasilinear modificado em diferentes sintonias.

Em seguida foi realizada uma simulação para se observar o desempenho dos controladores quando se varia a referência. A Figura 4 mostra a saída do sistema controlado pelo controlador quasilinear modificado sintonizado com  $\lambda=10$ . Observa-se que as referências são seguidas sem problemas de instabilidade. Na Figura 5 apresenta-se o respectivo esforço de controle. Já o controlador quasilinear não conseguiu controlar o sistema satisfatoriamente. Mesmo para  $\lambda=600$ , em que a resposta é bastante lenta, o sistema instabiliza quando a referência passa de  $r=1$  para  $r=1,5$ .

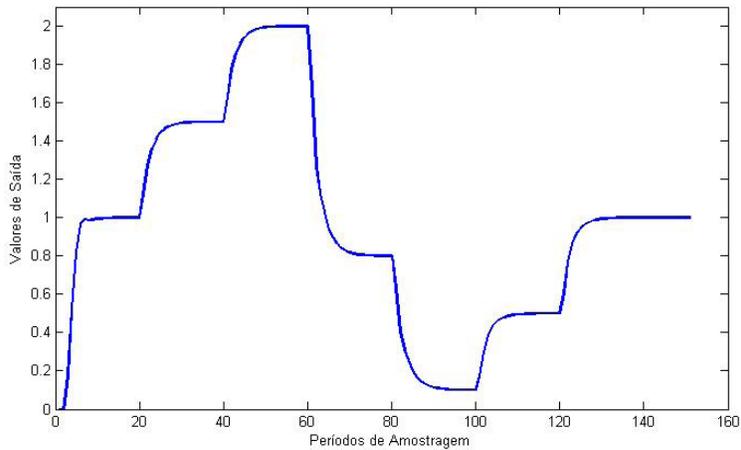


Figura 4. Saída do sistema controlado pelo controlador quasilinear modificado variando-se a referência.

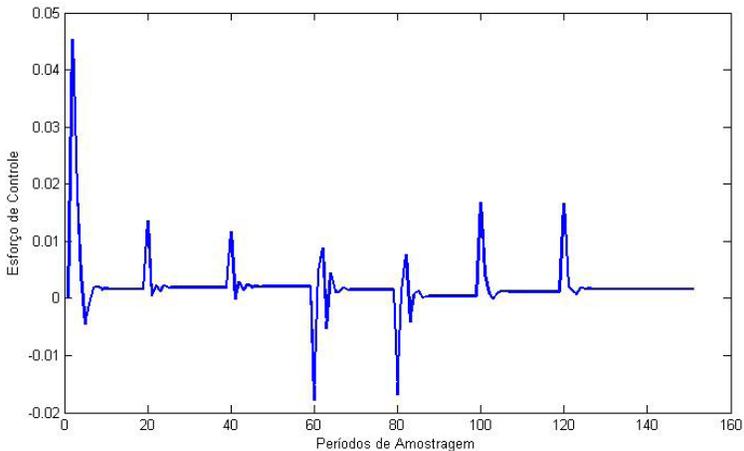


Figura 5. Esforço de controle para as saídas mostradas na Fig. 4.

Para se verificar a robustez do controlador quasilinear modificado, provocou-se um aumento de 10% nos parâmetros do modelo, diferenciando assim, dos parâmetros do modelo usados pelo controlador. Os resultados são mostrados nas Figuras 6 e 7, em que foi utilizado a mesma sintonia da simulação anterior, com  $\lambda = 10$ . Observa-se um sobre sinal de 4% na referência  $r = 1$ .

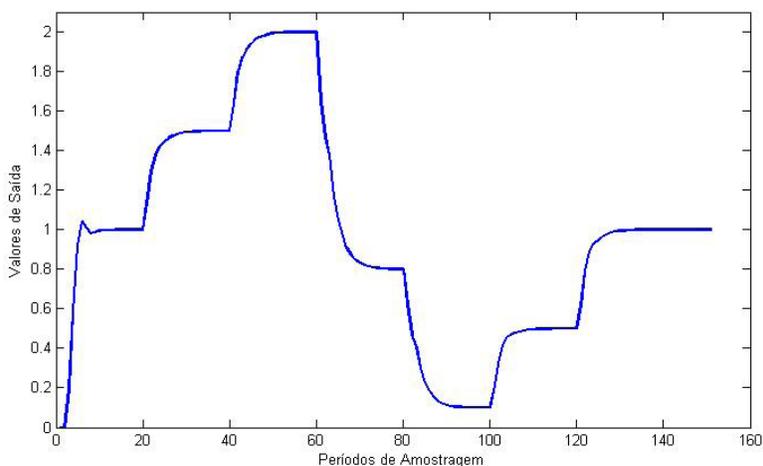


Figura 6. Saída do sistema controlado pelo controlador quasilinear modificado com variação de 10% nos parâmetros da planta.

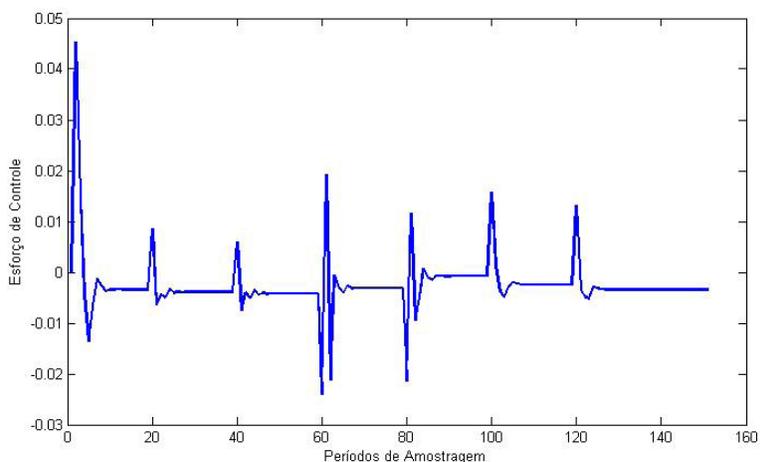


Figura 7. Esforço de controle para as saídas mostradas na Fig. 6.

Outra simulação foi realizada para se observar o desempenho dos controladores, utilizando-se o seguinte sistema:

$$\begin{aligned}
 y(k) = & 1,6y(k-1) - 0,63y(k-2) + 0,04u(k-1) + \\
 & 0,03u(k-2) + 0,4u(k-1)y(k-1) + \\
 & 0,3u(k-2)y(k-2).
 \end{aligned} \tag{24}$$

Este sistema também possui não linearidades bastante expressivas, porém ganho estático muito menor que o primeiro sistema. Para este caso utilizou-se um horizonte de predição  $N_y=10$  para os dois controladores. A sintonia utilizada para a ponderação na

ação de controle foi  $\lambda=850$  para o Controlador Quasilinear, pois um menor valor causou instabilidade no sistema. Porém a resposta ficou muito lenta, o que motivou a utilização de um ganho no controlador, cujo valor máximo possível de ser utilizado, sem instabilizar o sistema, foi aproximadamente  $8,0$ . Para a sintonia do Controlador Quasilinear Modificado foi utilizado  $\lambda=3$ . Assim obtiveram-se os resultados mostrados nas Figuras 8 e 9, quando se aplica uma referência do tipo degrau de magnitude  $5,0$ .

Na Figura 8, observa-se que a saída do sistema, quando controlado pelo Controlador Quasilinear Modificado, alcança a referência dentro do horizonte de previsão determinado,  $N_y=10$ , enquanto que a saída do sistema com outro controlador é muito lenta, mesmo aplicando-se um ganho igual a  $8,0$  no sinal de controle. Além disso, como aconteceu na simulação do primeiro sistema, pode-se reduzir o valor de  $\lambda$  na sintonia do Controlador Quasilinear Modificado, de modo que se alcança a referência em um tempo ainda menor, sem problemas de instabilidade do algoritmo.

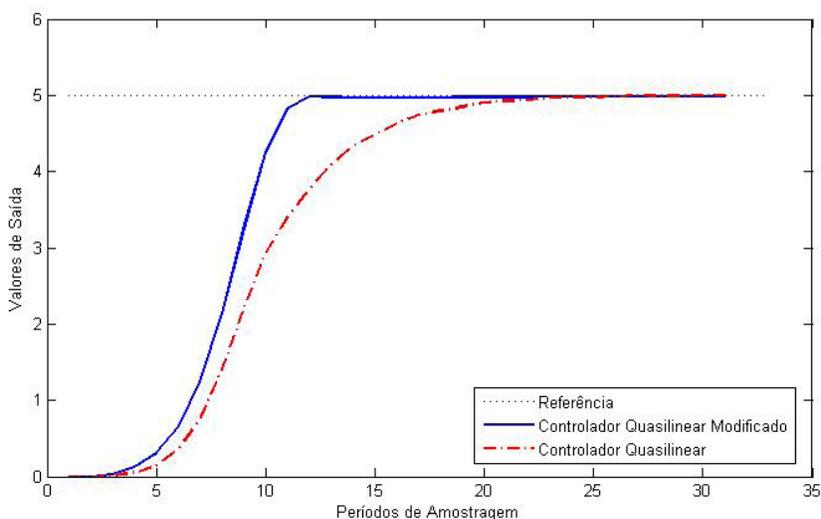


Figura 8. Saída do sistema controlado pelos controladores quasilinear e quasilinear modificado.

A Figura 9 apresenta o esforço de controle dos dois controladores. Observa-se que o pico do sinal do Controlador Quasilinear Modificado ainda foi um pouco menor que o do outro controlador.

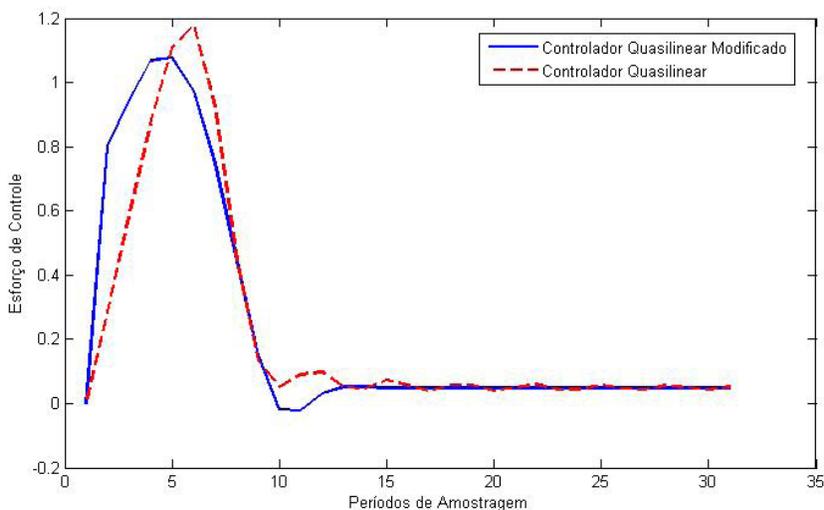


Figura 9. Esforço de controle para as saídas mostradas na Fig. 8.

## 4 | CONCLUSÃO

A modificação na quasilinearização, aqui apresentada, proporcionou melhorias no desempenho do controlador, principalmente quando as não linearidades do sistema são mais expressivas. Uma diferença importante entre os controladores aqui analisados é que o controlador quasilinear atualiza os polos do modelo do sistema linearizado, a cada instante de amostragem, alterando fortemente a dinâmica do sistema representado pelo modelo. Já o controlador quasilinear modificado, atualiza os zeros do modelo do sistema a cada instante de amostragem e também para cada horizonte de predição, alterando assim, tanto o ganho do sistema, como também a sua dinâmica. Observaram-se melhorias na optimalidade do controle, como também na estabilidade do algoritmo, quando se variou a ponderação na ação de controle, para os sistemas aqui simulados. Essas melhorias foram devidas principalmente às predições mais precisas, decorrentes da atualização do modelo preditor para cada horizonte de predição.

Um dos sistemas utilizados para simulação possui um alto ganho estático. Embora, na prática, a existência de processos com ganhos elevados não sejam frequentes, a solução aqui apresentada é adequada para estes casos.

## REFERÊNCIAS

Bloemen, H. H. J., van den Boom, T. J. J., Verbruggen, H. B. (2001). **An Optimization Algorithm Dedicated to a MPC Problem for Discrete Time Bilinear Models**. Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, p.2371-2381.

Bravo, C. O. A., Normey-Rico, J. E. e Torrico, B. C. (2008). **Nova Técnica para Controle de Plantas Não Lineares Utilizando Controle Preditivo Linear Baseado em Modelo**. XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG.

Camacho, E. F. and Bordons, C. **Model Predictive Control**. (2004). Springer- Verlag, London.

Clarke, D. W., Mohtadi, C. and Tuffs, P. S. (1987). **Generalized Predictive Control**, Automatica, vol. 21, nº 2.

De Keyser, R. M. C. (1998). **A gentle introduction to model based predictive control**. In PADI2 International Conference on Control Engineering and Signal Processing, Piura, Peru.

Fontes, A. B., Maitelli, A. L. and Salazar, A. O. (2002). **A new Bilinear Generalized Predictive Control Approach: Algorithm and Results**. In 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Barcelona.

Fontes, A. B. e Ângelo, E. (2006). **Controle Preditivo Generalizado Bilinear Aplicado a uma Coluna de Butadieno 1,3: A Compensação Iterativa, Uma Nova Abordagem**. XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-BA.

Goodhart S. G., K. J. Burnham. and D. James. (1994). **Bilinear self-tuning control of a high temperature heat treatment plant**. IEE Procedure Control Theory Applications. Vol. 141, No 1, pp. 12 -18.

Henson, M.A. (1998). **Nonlinear model predictive control: current status and future directions**. Computer and Chemical engineering, 23, 187-202.

Ionescu, C. Hodrea R. and De Keyser. R. (2008). **Impact of Disturbance Filter in Nonlinear EPSAC Predictive Control of Blood Glucose Level in Type I Diabetic Patients**. 17th IEEE International Conference on Control Applications. Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control San Antonio, Texas, USA, September 3-5.

King, J., Burnham, J. and James G. (1990). **Comparison of two identification techniques for bilinear systems**. Control and Computation, Vol. 18, nº.1, pp. 4-8.

Liu, G. Z., Li, P. (2004). **Generalized Predictive Control for a Class of Bilinear Systems**. IFAC 7th Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Hong Kong, China, p.952-956.

Lu, Y. and Arkunl, Y. A. (2003). **Practical multiple model adaptive strategy for single-loop mpc**. Control Engineering Practice, 11:141–159.

Mayne, D. Q., Rawlings, J. B., Rao, C. V., and Sokaert, P. O. M. (2000). **Constrained model predictive control: Stability and optimality**. Automatica, 36, 789–814.

Qin, S. J. and Badgwell T. A. (2003). **A Survey of Industrial Model Predictive Control technology**. Control Eng. Practice 11, 733–764.

Sakizlis, V., Manthanwar, A. M. and Pistikopoulos, E. N. (2005). **Robust parametric predictive control design for polytopically uncertain systems**. American Control Conference.

Sobrinho, M. O. S., Fontes, A. B. e Dórea, C. E. T. (2011). **A New Algorithm for Bilinear Predictive Control**. In 9th IEEE International Conference on Control and Automation. Santiago, Chile.

Sobrinho, M. O. S., Fontes, A. B. e Dórea, C. E. T. (2012). **Desenvolvimento de um Controlador Preditivo Não Linear Baseado em Modelo Compensado Aplicado a uma Coluna de Destilação Simulada, Caracterizada por um Modelo NARMAX**. XIX Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, PB.

Torrice, B. C. e Normey-Rico, J. E. (2004). **Controle Preditivo de Sistemas Não Lineares com Atraso**, XV Congresso Brasileiro de Automática.

Wan, Z. and Kotare, M. V. (2002). **Robust output feedback model predictive control using off-line linear matrix inequalities**. Journal of Process Control 12, 763-774.

**A**

Algoritmo doc2vec 30, 34, 35

Aterramento 140, 141, 142, 145, 146, 149, 150, 151, 152, 153, 154

**C**

Choque elétrico 140, 141, 142, 143, 144, 149, 152, 155

Cidades inteligentes 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 48, 53

Clusterização 37

Controle preditivo não-Linear 127

**D**

Design 40, 56, 57, 58, 59, 61, 64, 65, 71, 72, 138

Digital games 57, 58, 68, 69, 70

Dispositivo residual 140

Dispositivos móveis 1

**E**

Energia eólica 111, 114, 117, 157

Energias não renováveis 157

Energia solar 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 123, 124, 125

Energias renováveis 114, 157, 158, 167

Energia térmica 157, 158, 159

Engenharia de requisitos 11, 12, 13, 16, 17, 20

**F**

Fontes térmicas 156, 157, 158, 159, 160, 163, 167, 168

Fuzzy cognitive maps 39, 40, 49, 53, 54, 55, 56, 112, 125

**G**

Game customization 58

Garantia de qualidade 1, 8, 14

**H**

Homologação de releases Android 1

Hospital inteligente 80, 82, 85

**I**

Inserção automática 73

Interligação de programas 73

ISO/IEC 11, 12, 13, 14, 15, 16, 20

**L**

Layout de inclusão facilitada 73

**M**

Mapas cognitivos fuzzy 39, 110, 111, 118

Matlab 87, 88, 95, 108, 109

Modelos bilineares 126, 127, 128

**P**

Painéis fotovoltaicos 111, 113, 117, 122

Processos 2, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 20, 47, 73, 75, 88, 89, 90, 127, 137, 159, 161, 162, 164, 166

Puma 560 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 96, 97, 99, 100, 107, 108

**Q**

Qualidade de software 1, 4, 17, 20

**R**

Robô 49, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 97, 99, 101, 102, 104, 107, 108, 109

Robótica 87, 88, 89, 90, 93, 107, 108, 109, 120

**S**

Satisfação do cliente 111, 122

Sistemas inteligentes de computação 39

Software 1, 2, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 41, 54, 61, 73, 74, 76, 77, 78, 83, 87, 89, 90, 95, 96, 99, 107, 118, 122

**T**

Teste de software 1

**U**

UML 11, 12, 18, 19, 20

User experience (UE) 58, 59, 61, 62, 64, 70, 72

**V**

Virtual things 80

**W**

Web of things 80, 81, 83, 86

Web scraping 21, 22, 37

# ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO:

Docência, pesquisa e inovação tecnológica

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO:

Docência, pesquisa e inovação tecnológica

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)