

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

FACULDADE DE ENGENHARIAS ELÉTRICA E BIOMÉDICA

**ESTUDO DE CASO: FILA M/M/1**

ARTHUR FELIPE DOS SANTOS FERNANDES

GLOUVER NASCIMENTO

Belém

2022

ARTHUR FELIPE DOS SANTOS FERNANDES

GLOUVER NASCIMENTO

**ESTUDO DE CASO: FILA M/M/1**

Belém – PA

2022

SUMÁRIO

[1. INTRODUÇÃO 11](#_Toc106270489)

[1.1. Objetivos 12](#_Toc106270490)

[1.2. Estrutura do trabalho 12](#_Toc106270491)

[2. METODOLOGIA 14](#_Toc106270492)

[2.1. Levantamento bibliográfico obtido com o BDTD 14](#_Toc106270493)

[2.2. Levantamento bibliográfico obtido com o IEEE 18](#_Toc106270494)

[2.3. Plantas simuladas 19](#_Toc106270495)

[2.4. Conclusão do capítulo 20](#_Toc106270496)

[3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 21](#_Toc106270497)

[3.1. Níveis de não linearidade 22](#_Toc106270498)

[3.1.1. Respostas assimétricas 22](#_Toc106270499)

[3.1.2. Geração de harmônica 23](#_Toc106270500)

[3.1.3. Multiplicidade da entrada 23](#_Toc106270501)

[3.1.4. Estabilidade dependente da entrada 25](#_Toc106270505)

[3.1.5. Geração de sub-harmônicas 26](#_Toc106270510)

[3.1.6. Caos 28](#_Toc106270511)

[3.1.7. Multiplicidade da saída 29](#_Toc106270512)

[3.2. Detecção de não linearidade 30](#_Toc106270513)

[3.3. Sinais de excitação 33](#_Toc106270514)

[3.3.1. Sinal APRBS 33](#_Toc106270515)

[3.4. Arquiteturas 36](#_Toc106270516)

[3.4.1. ARX 36](#_Toc106270517)

[3.4.2. NARMAX 36](#_Toc106270518)

[3.5. Análise de estrutura 39](#_Toc106270519)

[3.5.1. *Error Reduction Ratio* (ERR) 39](#_Toc106270520)

[3.6. Algoritmos de estimação de parâmetros 39](#_Toc106270521)

[3.6.1. Mínimos Quadrados 39](#_Toc106270522)

[3.6.2. Mínimos Quadrados Ortogonais 40](#_Toc106270523)

[3.6.3. Mínimos Quadrados Estendidos 41](#_Toc106270524)

[3.6.4. Mínimos Quadrados Recursivos 42](#_Toc106270525)

[3.7. Critérios de validação 43](#_Toc106270526)

[3.8. Teorias de Controle 45](#_Toc106270527)

[*3.8.1.* *Feedback Linearization* 45](#_Toc106270528)

[3.8.2. Controlador por alocação de polos incremental direto 46](#_Toc106270529)

[3.9. Conclusão do capítulo 47](#_Toc106270530)

[4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 48](#_Toc106270531)

[4.1. Modelagem 48](#_Toc106270532)

[4.1.1. Caso Linear 48](#_Toc106270533)

[4.1.2. Caso Não Linear Fraco: 52](#_Toc106270534)

[4.1.3. Caso Não Linear Intermediário: 56](#_Toc106270535)

[4.1.4. Caso Não Linear Forte 59](#_Toc106270536)

[4.2. Controle 63](#_Toc106270537)

[4.2.1. Caso Linear: 64](#_Toc106270538)

[4.2.2. Caso Não Linear Fraco 68](#_Toc106270539)

[4.2.3. Caso Não Linear Intermediário 71](#_Toc106270540)

[4.2.4. Caso Não Linear Forte 75](#_Toc106270541)

[4.3. Conclusão do capítulo 79](#_Toc106270542)

[5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 83](#_Toc106270543)

[6. REFERÊNCIAS 85](#_Toc106270544)

[7. APÊNDICE A – *LINK* PARA OS CÓDIGOS 87](#_Toc106270545)

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

[Figura 2.1 – Distribuição das teses 15](#_Toc106270736)

[Figura 2.2 – Teses por ano 15](#_Toc106270737)

[Figura 2.3 – Distribuição das teses pela dependência administrativa da universidade 16](#_Toc106270738)

[Figura 2.4 – Distribuição das teses no território nacional 17](#_Toc106270739)

[Figura 2.5 – Distribuição dos artigos 18](#_Toc106270740)

[Figura 2.6 – Artigos por ano 19](#_Toc106270741)

[Figura 3.1 – Saída assimétrica 22](#_Toc106270742)

[Figura 3.2 – Geração harmônica 23](#_Toc106270743)

[Figura 3.3 – Mapa estático entrada–saída 24](#_Toc106270744)

[Figura 3.4 – Multiplicidade de entrada 25](#_Toc106270745)

[Figura 3.5 – Estabilidade dependente da entrada 26](#_Toc106270746)

[Figura 3.6 – Geração sub-harmônica (nT = 2 e A = 0,12) 27](#_Toc106270747)

[Figura 3.7 – Geração sub-harmônica (nT = 8 e A = 0,06) 27](#_Toc106270748)

[Figura 3.8 – Geração sub-harmônica (nT = e A = 0,015) 28](#_Toc106270749)

[Figura 3.9 – Caos 29](#_Toc106270750)

[Figura 3.10 – Multiplicidade da saída 30](#_Toc106270751)

[Figura 3.11 – Teste de não linearidade – caso linear 32](#_Toc106270752)

[Figura 3.12 – Teste de não linearidade – caso não linear 33](#_Toc106270753)

[Figura 3.13 – Sinal APRBS – 34](#_Toc106270754)

[Figura 3.14 – Efeito da frequência na excitação dinâmica não linear 35](#_Toc106270755)

[Figura 3.15 – Efeito da frequência na excitação dinâmica não linear 35](#_Toc106270756)

[Figura 3.16 – Comparativo entre saída real e saída predita durante o treinamento 44](#_Toc106270757)

[Figura 3.17 – Comparativo entre saída real e saída predita durante a validação 44](#_Toc106270758)

[Figura 3.18 – Taxa RMSE sob a previsão de passos à frente 45](#_Toc106270759)

[Figura 3.19 – Malha de controle incremental 46](#_Toc106270760)

[Figura 4.1 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso linear método MQO 49](#_Toc106270761)

[Figura 4.2 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso linear método MQO 50](#_Toc106270762)

[Figura 4.3 – Evolução dos parâmetros , caso linear método MQR 51](#_Toc106270763)

[Figura 4.4 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso linear método MQR 51](#_Toc106270764)

[Figura 4.5 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso linear método MQR 52](#_Toc106270765)

[Figura 4.6 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear fraco, método MQO 53](#_Toc106270766)

[Figura 4.7 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear fraco, método MQO 53](#_Toc106270767)

[Figura 4.8 – Evolução dos parâmetros θ, caso linear método MQR 54](#_Toc106270768)

[Figura 4.9 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear fraco, método MQR 55](#_Toc106270769)

[Figura 4.10 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear, método MQR 55](#_Toc106270770)

[Figura 4.11 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear intermediário, método MQO 56](#_Toc106270771)

[Figura 4.12 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear intermediário, método MQO 57](#_Toc106270772)

[Figura 4.13 – Evolução dos parâmetros θ, caso linear método MQR 58](#_Toc106270773)

[Figura 4.14 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear intermediário, método MQR 58](#_Toc106270774)

[Figura 4.15 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear intermediário, método MQR 59](#_Toc106270775)

[Figura 4.16 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear forte, método MQO 60](#_Toc106270776)

[Figura 4.17 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear forte, método MQO 60](#_Toc106270777)

[Figura 4.18 – Evolução dos parâmetros θ, caso linear método MQR 61](#_Toc106270778)

[Figura 4.19 – Comparativo saída da planta e saída do modelo, caso não linear forte, método MQR 62](#_Toc106270779)

[Figura 4.20 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, caso não linear forte, método MQR 63](#_Toc106270780)

[Figura 4.21 – Ação de controle no caso linear, NARMAX – MQO 64](#_Toc106270781)

[Figura 4.22 – Planta linear controlada com base no modelo NARMAX – MQO 65](#_Toc106270782)

[Figura 4.23 – Evolução dos polinômios R e S, caso linear, método ARX-MQR 66](#_Toc106270783)

[Figura 4.24 – Ação de controle no caso linear, ARX – MQO 67](#_Toc106270784)

[Figura 4.25 – Planta controlada por sinal calculado com base no modelo ARX – MQR 67](#_Toc106270785)

[Figura 4.26 – Ação de controle no caso não linear fraco, NARMAX – MQO 68](#_Toc106270786)

[Figura 4.27 – Planta não linear fraca controlada com base no modelo NARMAX – MQO 69](#_Toc106270787)

[Figura 4.28 – Evolução dos polinômios R e S, caso não linear fraco, método ARX-MQR 70](#_Toc106270788)

[Figura 4.29 – Ação de controle no caso linear, ARX – MQO 70](#_Toc106270789)

[Figura 4.30 – Planta controlada por sinal calculado com base no modelo ARX – MQR 71](#_Toc106270790)

[Figura 4.31 – Ação de controle no caso não linear intermediário, NARMAX – MQO 72](#_Toc106270791)

[Figura 4.32 – Planta controlada com base no modelo NARMAX – MQO 72](#_Toc106270792)

[Figura 4.33 – Evolução dos polinômios R e S, caso não linear intermediário, método ARX-MQR 73](#_Toc106270793)

[Figura 4.34 – Ação de controle no caso não linear intermediário, ARX – MQO 74](#_Toc106270794)

[Figura 4.35 – Planta controlada por sinal calculado com base no modelo ARX – MQR 74](#_Toc106270795)

[Figura 4.36 – Ação de controle no caso não linear forte, NARMAX – MQO 75](#_Toc106270796)

[Figura 4.37 – Planta não linear forte controlada com base no modelo NARMAX – MQO 76](#_Toc106270797)

[Figura 4.38 – Evolução dos polinômios R e S, caso não linear forte, método ARX-MQR 77](#_Toc106270798)

[Figura 4.39 – Ação de controle no caso não linear forte, ARX – MQO 78](#_Toc106270799)

[Figura 4.40 – Planta não linear forte controlada por sinal calculado com base no modelo ARX – MQR 78](#_Toc106270800)

[Figura 4.41 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, comparativo linear 79](#_Toc106270801)

[Figura 4.42 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, comparativo não linear fraco 80](#_Toc106270802)

[Figura 4.43 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, comparativo não linear intermediário 81](#_Toc106270803)

[Figura 4.44 – Taxa RMSE para a previsão de passos à frente, comparativo não linear forte 82](#_Toc106270804)

**LISTA DE TABELAS**

[Quadro 2.1 – Distribuição de teses por universidade 18](#_Toc106270615)

[Quadro 2.2 – Plantas utilizadas 19](#_Toc106270616)

[Quadro 3.1 – Classes de não linearidade 22](#_Toc106270617)

[Quadro 4.1 – Amplitude do sinal APRBS aplicado em cada caso 48](#_Toc106270618)

[Quadro 4.2 – Sinal de referência aplicado em cada caso 63](#_Toc106270619)

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

APRBS *Amplitude Modulated Pseudo Random Binary Sequence*

ARX *AutoRegressive with Exogenous Input*

BDTD Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

ERR *Error Reduction Ratio*

FROLS *Forward Regression Orthogonal Least Squares*

IA Inteligência Artificial

IBICT Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

MATLAB *Matrix* *Laboratory*

MQ Mínimos Quadrados

MQE Mínimos Quadrados Estendidos

MQO Mínimos Quadrados Ortogonais

MQR Mínimos Quadrados Recursivos

NARMAX *Nonlinear AutoRegressive Moving Average with Exogenous Input*

NARX *Nonlinear AutoRegressive with Exogenous Input*

RMSE *Root Mean Square Error*

PRBS *Pseudo Random Binary Sequence*

**LISTA DE SÍMBOLOS**

Período de amostragem

Constante de tempo

Saída

Saída estimada

Entrada

Ruído

Erro

Referência

Somatório de atrasos

Atraso da saída

Atraso da entrada

Atraso do ruído

M Total de termos

Conjunto de saída, entrada e ruído

Vetor de parâmetros

Vetor de parâmetros estimados

Grau de não linearidade

Total de amostras

Matriz de parâmetros

Predição de um passo à frente

Predição de passos à frente

Resíduo

Matriz auxiliar de ortogonalização

Vetor de parâmetros auxiliar

Ruído branco

Função de autocorrelação

# INTRODUÇÃO

Fila MM1,

## Objetivos

O objetivo geral deste estudo é analisar o processo de identificação e controle das 4 plantas selecionadas.

Os objetivos específicos são:

1. Identificar os modelos lineares e não lineares;
2. Analisar a capacidade preditiva dos modelos lineares e não lineares;
3. Analisar a eficácia das técnicas de controle utilizando modelos lineares e não lineares;

## Estrutura do trabalho

Este estudo se encontra dividido da seguinte maneira:

1. Introdução: onde foram expostas as motivações, o objeto de estudo, o problema, e os objetivos deste;
2. Metodologia: na qual é descrita a revisão bibliográfica, além das plantas utilizadas nas simulações;
3. Fundamentação teórico: apresenta-se toda a justificativa matemática das arquiteturas, algoritmos e classificações utilizados;
4. Resultados e discussão: encontram-se os resultados deste estudo;
5. Considerações finais: onde são retomados os objetivos e a conclusão relacionada ao estudo.

# METODOLOGIA

# FUNDAMENTAÇÃO

# RESULTADOS

Durante a simulação foram utilizados, o valor ‘1233’ como semente para a geração de números aleatórios, 50 pacotes a serem simulados, uma taxa de serviço de ‘0,1’, uma taxa de chegada que variou no intervalo [0,01; 1] e distribuição exponencial para a geração dos instantes de chegada e das durações dos serviços.

# CONCLUSÃO

# APÊNDICE A – *LINK* PARA O CÓDIGO

https://github.com/Ploita/MM1