

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CAIO MARIANO DA SILVA ANASTÁCIO**

**REVISÃO DE UMA METODOLOGIA EMPÍRICA DE AJUSTE DO  
CONTROLE PID PARA SISTEMAS TITO USANDO O MATLAB**

**VOLTA REDONDA**

**2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**REVISÃO DE UMA METODOLOGIA EMPÍRICA DE AJUSTE DO  
CONTROLE PID PARA SISTEMAS TITO USANDO O MATLAB**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aluno:

Caio Mariano da Silva Anastácio

Orientador:

Prof. Dr. Péricles Guedes Alves

**VOLTA REDONDA**

**2017**



Fundação Oswaldo Aranha



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Curso:** Engenharia Elétrica

**Acadêmico: Matrícula:** Caio Mariano da Silva Anastácio 201311145

**Título do TCC:** Revisão de Uma Metodologia Empírica de Ajuste do Controle PID para Sistemas TITO Usando o MATLAB

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

Aprovada em 11 de NOVEMBRO de 2017

Banca Avaliadora:

Professor Orientador

Péricles Guedes Alves, Doutor, UniFOA

Pesquisador Avaliador

Italo Pinto Rodrigues, Mestre, INPE

Professor Avaliador

Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA

"I had my ups and downs, but I always find the inner strength to pull myself up. I WAS SERVED LEMONS, BUT I MADE LEMONADE."

Hattie White

## **AGRADECIMENTOS**

Não há palavras para poder demonstrar o tamanho da minha gratidão pelo professor Péricles. Todo direcionamento e as oportunidades me tornaram um ser humano melhor, muito obrigado Sensei.

## RESUMO

Este trabalho trata da validação da metodologia desenvolvida em sistemas de duas entradas e duas saídas (TITO) utilizando o controlador PID criado pelo autor Alves (1988). Mais especificamente, o principal objetivo é aplicar os métodos tendo como base o auxílio do programa Matlab visando uma confiabilidade de resultados para que se possa afirmar a sua veracidade dentre as técnicas já disponíveis que são empregados no controle de processos multivariáveis. Na metodologia proposta (Alves, 1988), o objetivo de conseguir realizar um ajuste satisfatório em sistemas TITO, começa pela criação de um novo modelo baseado em outras metodologias que deve ser seguido etapa por etapa para o desenvolvimento do ajuste grosso e a criação de uma região composta pelos valores críticos dos ganhos do sistema, sendo possível a sua alteração, a fim de se obter o ajuste fino.

**Palavras-chave:** Controle; TITO; PID; Matlab.

## **ABSTRACT**

This work deals with the validation of the methodology developed in two input and two output systems (TITO) using the PID controller created by the author Alves (1988). More specifically, the main objective is to apply the methods based on the aid of the Matlab program aiming at a reliability of results so that its truth can be affirmed among the techniques already available that are used in the control of multivariate processes. In the proposed methodology (Alves, 1988), the objective of achieving a satisfactory adjustment in TITO systems begins with the creation of a new model based on other methodologies that must be followed step by step for the development of the gross adjustment and the creation of a region composed by the critical values of the gains of the system, being possible to change them in order to obtain the fine adjustment.

**Keywords:** Control; TITO; PID; Matlab.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 18 |
| 1.1. Motivação.....  | 20 |
| 1.2. Objetivo .....  | 20 |
| 1.3. Estrutura do Trabalho .....                             | 21 |
| 2. Princípios Gerais de Controle .....                       | 22 |
| 2.1. CONTROLADOR PID.....                                    | 24 |
| 2.1.1. Controlador Proporcional (P) .....                    | 25 |
| 2.1.2. Controlador Proporcional e Integral (PI) .....        | 25 |
| 2.1.3. Controlador Proporcional e Derivativo (PD) .....      | 26 |
| 2.1.4. Controlador Proporcional, Integral e Derivativo ..... | 26 |
| 2.2. Índices de Desempenho Baseados no Erro .....            | 27 |
| 2.3. Critérios de Desempenho.....                            | 29 |
| 2.4. Metodologia de Ziegler e Nichols .....                  | 30 |
| 2.5. O Controlador PID Multivariável .....                   | 32 |
| 2.6. Metodologia de Isermann.....                            | 33 |
| 2.6.1. Região de Estabilidade.....                           | 34 |
| 2.6.2. Método de Isermann .....                              | 36 |
| 3. MATLAB.....   | 39 |
| 3.1. Graphical User Interfaces.....                          | 39 |
| 3.2. Especificações da Saída .....                           | 42 |
| 3.3. Composição e Utilização do Simulador .....              | 43 |
| 4. Aplicação e Resultados da Metodologia de Referência.....  | 48 |
| 4.1. Introdução .....  | 48 |
| 4.2. Simulações utilizando a metodologia de Isermann .....   | 49 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 4.2.1. | Primeiro Processo.....   | 49  |
| 4.2.2. | Segundo Processo.....  | 58  |
| 4.2.3. | Terceiro Processo.....   | 67  |
| 4.2.4. | Quarto Processo .....  | 72  |
| 5.     | Controle de Sistemas TITO Utilizando Ajuste Grosso e Ajuste Fino ..... | 77  |
| 5.1.   | AJUSTE GROSSO.....   | 77  |
| 5.1.1. | AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PROPORCIONAL .....                           | 79  |
| 5.1.2. | AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PI.....                                      | 80  |
| 5.1.3. | AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PID .....                                    | 81  |
| 5.2.   | AJUSTE FINO .....  | 81  |
| 5.3.   | FLUXOGRAMA DE UTILIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO .....                        | 86  |
| 5.4.   | Aplicação da Metodologia .....   | 89  |
| 5.4.1. | PRIMEIRO PROCESSO .....  | 89  |
| 5.4.2. | SEGUNDO PROCESSO .....   | 109 |
| 5.4.3. | TERCEIRO PROCESSO .....  | 138 |
| 5.4.4. | QUARTO PROCESSO.....   | 160 |
| 6.     | CONCLUSÕES .....   | 179 |
| 7.     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 181 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1 - Parâmetros do Controlador .....                            | 31 |
| Quadro 2 - Esboço das Funções de Transferência do Processo TITO ..... | 48 |
| Quadro 3 - Primeiro Processo .....                                    | 49 |
| Quadro 4 - Primeiro Parâmetro .....                                   | 50 |
| Quadro 5 - Resposta do Primeiro Parâmetro .....                       | 50 |
| Quadro 6 - Segundo Parâmetro .....                                    | 50 |
| Quadro 7 - Resposta do Segundo Parâmetro .....                        | 51 |
| Quadro 8 - Ajuste Proporcional .....                                  | 51 |
| Quadro 9 - Saídas, Ajuste Proporcional, dados do ALVES .....          | 52 |
| Quadro 10 - Saídas, Ajuste Proporcional, dados do Autor .....         | 53 |
| Quadro 11 - Resultados Ajuste Proporcional .....                      | 54 |
| Quadro 12 - Segundo Parâmetro .....                                   | 55 |
| Quadro 13 - Saídas Ajuste PI .....                                    | 56 |
| Quadro 14 - Resultados PI .....                                       | 57 |
| Quadro 15 - Terceiro Parâmetro .....                                  | 58 |
| Quadro 16 - Segundo Processo .....                                    | 58 |
| Quadro 17 - Primeiro Parâmetro .....                                  | 59 |
| Quadro 18 - Resposta do Primeiro Parâmetro .....                      | 59 |
| Quadro 19 - Segundo Parâmetro .....                                   | 59 |
| Quadro 20 - Resposta do Segundo Parâmetro .....                       | 60 |
| Quadro 21 - Ajuste Proporcional .....                                 | 60 |
| Quadro 22 - Saídas Proporcional .....                                 | 62 |
| Quadro 23 - Resultados Proporcional .....                             | 63 |
| Quadro 24 - Parâmetros PI .....                                       | 63 |
| Quadro 25 - Saída Ajuste PI .....                                     | 64 |
| Quadro 26 - Resultados PI .....                                       | 65 |
| Quadro 27 - Parâmetros PID .....                                      | 65 |
| Quadro 28 - Saídas PID .....  | 66 |
| Quadro 29 - Resultado PID .....                                       | 67 |
| Quadro 30 - Terceiro Processo .....                                   | 68 |
| Quadro 31 - Primeiro Parâmetro .....                                  | 68 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 32 - Saída Primeiro Processo.....   | 68  |
| Quadro 33 - Segundo Parâmetro .....  | 69  |
| Quadro 34 - Saída Segundo Parâmetro .....  | 69  |
| Quadro 35 - Ajuste Proporcional .....  | 69  |
| Quadro 36 - Resultados Ajuste Proporcional .....   | 70  |
| Quadro 37 - Resultados Proporcional .....  | 71  |
| Quadro 38 - Ajuste PI .....  | 71  |
| Quadro 39 - Quarto Processo .....  | 72  |
| Quadro 40 - Primeiro Parâmetro .....   | 72  |
| Quadro 41 - Segundo Parâmetro .....  | 72  |
| Quadro 42 - Ajuste Proporcional .....  | 73  |
| Quadro 43 - Saída Proporcional.....  | 74  |
| Quadro 44 - Resultado Proporcional .....   | 75  |
| Quadro 45 - Ajuste PI .....  | 76  |
| Quadro 46 - Determinação do Quadrante No Qual se Situa a Região de Estabilidade do Sistema que se Deseja Controlar ..... | 78  |
| Quadro 47 - Quadro para Utilização do Ajuste Fino .....  | 82  |
| Quadro 48 - Pontos A e B, Primeiro Processo .....  | 89  |
| Quadro 49 - Pontos C e D, Primeiro Processo.....   | 90  |
| Quadro 50 - Determinação dos pontos 1,2 e 3.....   | 90  |
| Quadro 51 - Determinação do ITAE .....   | 92  |
| Quadro 52 - Determinação do ITAE ponderado .....   | 92  |
| Quadro 53 - Ajuste Grosso : Proporcional.....  | 93  |
| Quadro 54 - Saídas : Ajuste Grosso Proporcional.....   | 94  |
| Quadro 55 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional.....   | 95  |
| Quadro 56 - Ajuste Fino Proporcional .....   | 96  |
| Quadro 57 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....  | 98  |
| Quadro 58 - Ajuste Grosso PI .....   | 99  |
| Quadro 59 - Resultado: Ajuste Grosso PI .....  | 101 |
| Quadro 60 - Ajuste Fino PI.....  | 102 |
| Quadro 61 - Resultados: Ajuste Fino PI .....   | 104 |
| Quadro 62 - Ajuste Fino PI.....  | 104 |
| Quadro 63 - Resultados: Ajuste Fino PI .....   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 64 - Ajuste Grosso PID.....                     | 107 |
| Quadro 65 - Resultado Ajuste Grosso PID.....           | 108 |
| Quadro 66 - Pontos A e B, Segundo Processo .....       | 109 |
| Quadro 67 - Pontos C e D, Segundo Processo.....        | 109 |
| Quadro 68 - Determinação dos pontos 1,2 e 3.....       | 110 |
| Quadro 69 - Determinação ITAE .....                    | 110 |
| Quadro 70 - Determinação do ITAE ponderado.....        | 112 |
| Quadro 71 - Ajuste Grosso : Proporcional.....          | 113 |
| Quadro 72 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional..... | 114 |
| Quadro 73 - Ajuste Fino : Proporcional .....           | 116 |
| Quadro 74 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....  | 117 |
| Quadro 75 - Ajuste Grosso PI .....                     | 119 |
| Quadro 76 - Resultado: Ajuste Grosso PI .....          | 121 |
| Quadro 77 - Ajuste Fino : PI.....                      | 122 |
| Quadro 78 - Resultado: Ajuste Fino PI.....             | 124 |
| Quadro 79 - Ajuste Fino : PI.....                      | 125 |
| Quadro 80 - Resultado: Ajuste Fino PI.....             | 125 |
| Quadro 81 - Ajuste Grosso: PID.....                    | 127 |
| Quadro 82 - Resultado: Ajuste Grosso PID.....          | 129 |
| Quadro 83 - Ajuste Fino : PID .....                    | 130 |
| Quadro 84 - Resultado: Ajuste Fino PID .....           | 131 |
| Quadro 85 - Ajuste Fino : PID .....                    | 133 |
| Quadro 86 - Resultado: Ajuste Fino PID .....           | 135 |
| Quadro 87 - Ajuste Fino: PID .....                     | 136 |
| Quadro 88 - Resultado: Ajuste Fino PID .....           | 138 |
| Quadro 89 - Pontos A e B, Terceiro Processo .....      | 139 |
| Quadro 90 - Pontos C e D, Terceiro Processo .....      | 139 |
| Quadro 91 - Determinação dos pontos 1,2 e 3.....       | 139 |
| Quadro 92 - Determinação ITAE .....                    | 140 |
| Quadro 93 - Determinação do ITAE ponderado .....       | 141 |
| Quadro 94 - Ajuste Grosso : Proporcional.....          | 141 |
| Quadro 95 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional..... | 142 |
| Quadro 96 - Ajuste Fino Proporcional .....             | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| Quadro 97 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....    | 143 |
| Quadro 98 - Ajuste Fino Proporcional .....               | 145 |
| Quadro 99 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....    | 147 |
| Quadro 100 - Ajuste Grosso: PI .....                     | 148 |
| Quadro 101 - Resultado: Ajuste Grosso PI .....           | 149 |
| Quadro 102 - Ajuste Fino PI .....                        | 151 |
| Quadro 103 - Resultado: Ajuste Fino PI .....             | 153 |
| Quadro 104 - Ajuste Grosso PID .....                     | 154 |
| Quadro 105 - Resultado: Ajuste Grosso PID .....          | 155 |
| Quadro 106 - Ajuste Fino PID .....                       | 157 |
| Quadro 107 - Resultado: Ajuste Fino PID .....            | 158 |
| Quadro 108 - Pontos A e B, Quarto Processo .....         | 160 |
| Quadro 109 - Pontos C e D, Quarto Processo .....         | 160 |
| Quadro 110 - Determinação dos pontos 1,2 e 3 .....       | 161 |
| Quadro 111 - Determinação ITAE .....                     | 161 |
| Quadro 112 - Determinação do ITAE ponderado .....        | 162 |
| Quadro 113 - Ajuste Grosso : Proporcional .....          | 163 |
| Quadro 114 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional ..... | 165 |
| Quadro 115 - Ajuste Fino Proporcional .....              | 165 |
| Quadro 116 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....   | 167 |
| Quadro 117 - Ajuste Fino Proporcional .....              | 168 |
| Quadro 118 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional .....   | 168 |
| Quadro 119 - Ajuste Grosso PI .....                      | 170 |
| Quadro 120 - Resultado: Ajuste Fino PI .....             | 172 |
| Quadro 121 - Ajuste Grosso PID .....                     | 173 |
| Quadro 122 - Resultado: Ajuste Grosso PID .....          | 175 |
| Quadro 123 - Ajuste Fino PID .....                       | 176 |
| Quadro 124 - Resultado: Ajuste Fino PID .....            | 176 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Controle de Malha Fechada .....   | 22 |
| Figura 2 – Sistema de Temperatura .....  | 23 |
| Figura 3 – Sistema de Nível .....  | 24 |
| Figura 4 - Sistema SISO.....   | 24 |
| Figura 5 - Estrutura Básica de Controle PID .....  | 27 |
| Figura 6 - Critérios de Desempenho .....   | 30 |
| Figura 7 - Limite de estabilidade de um sistema de malha fechada.....  | 31 |
| Figura 8 - Sistema TITO.....   | 32 |
| Figura 9 - Estrutura do Controle TITO estudada. ....   | 33 |
| Figura 10 - Região de Estabilidade .....   | 35 |
| Figura 11 - Regiões permissíveis de ganhos dos controladores para sistema de duas entradas e duas saídas ..... | 35 |
| Figura 12 - GUI, Simulador criado pelo Autor.....  | 41 |
| Figura 13 - Entrada de Dados do Sistema TITO .....   | 44 |
| Figura 14 - Entrada de Dados Para Ajuste do PID .....  | 45 |
| Figura 15 - Gráfico das Saídas 1 e 2.....  | 46 |
| Figura 16 - Esboço dos Resultados Gerados.....   | 47 |
| Figura 17 - Método de Isermann. Primeiro Processo, dados do Alves.....   | 51 |
| Figura 18 - Método de Isermann. Primeiro Processo, dados do Autor.....   | 52 |
| Figura 19 - Método de Isermann. Segundo Processo, dados do Alves.....  | 61 |
| Figura 20 - Método de Isermann. Segundo Processo, dados do Autor.....  | 61 |
| Figura 21 - Método de Isermann. Terceiro Processo, Alves e Autor .....   | 70 |
| Figura 22 - Método de Isermann. Quarto Processo, Alves e Autor.. ..  | 73 |
| Figura 23 - Metodologia Desenvolvida por Péricles Guedes Alves .....   | 78 |
| Figura 24 - Sentidos de Percurso Dentro da Região de Estabilidade .....  | 83 |
| Figura 25 - Fluxograma, Primeira Parte .....   | 86 |
| Figura 26 - Fluxograma, Segunda Parte .....  | 87 |
| Figura 27 - Fluxograma, Terceira Parte.....  | 88 |
| Figura 28 - Região de Estabilidade, Dados do Alves .....   | 91 |
| Figura 29 - Região de Estabilidade, Dados do Autor .....   | 91 |
| Figura 30 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....   | 97 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 31 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....              | 97  |
| Figura 32 - Saída 1, Ajuste Grosso PI.....                      | 100 |
| Figura 33 - Saída 2, Ajuste Grosso PI.....                      | 100 |
| Figura 34 - Saída 1, Ajuste Fino PI. ....                       | 103 |
| Figura 35 - Saída 2, Ajuste Fino PI. ....                       | 103 |
| Figura 36 - Saída 1, Ajuste Fino PI. ....                       | 105 |
| Figura 37 - Saída 2, Ajuste Fino PI. ....                       | 105 |
| Figura 38 - Região de Estabilidade, Dados do Alves .....        | 111 |
| Figura 39 - Região de Estabilidade, Dados do Autor .....        | 111 |
| Figura 40 - Saída 1, Ajuste Grosso Proporcional .....           | 115 |
| Figura 41 - Saída 2, Ajuste Grosso Proporcional .....           | 115 |
| Figura 42 – Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....              | 118 |
| Figura 43 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....              | 118 |
| Figura 44 - Saída 1, Ajuste Grosso PI.....                      | 120 |
| Figura 45 - Saída 2, Ajuste Grosso PI.....                      | 120 |
| Figura 46 - Saída 1, Ajuste Fino PI .....                       | 123 |
| Figura 47 - Saída 2, Ajuste Fino PI .....                       | 123 |
| Figura 48 - Saída 1, Ajuste Fino PI .....                       | 126 |
| Figura 49 - Saída 2, Ajuste Fino PI .....                       | 126 |
| Figura 50 - Saída 1, Ajuste Grosso PID .....                    | 128 |
| Figura 51 - Saída 2, Ajuste Grosso PID .....                    | 128 |
| Figura 52 - Saída 1, Ajuste Fino PID.....                       | 132 |
| Figura 53 - Saída 2, Ajuste Fino PID.....                       | 132 |
| Figura 54 - Saída 1, Ajuste Fino PID.....                       | 134 |
| Figura 55 - Saída 2, Ajuste Fino PID.....                       | 134 |
| Figura 56 - Saída 1, Ajuste Fino PID.....                       | 137 |
| Figura 57 - Saída 2, Ajuste Fino PID.....                       | 137 |
| Figura 58 - Região de Estabilidade, Dados do Alves e Autor..... | 140 |
| Figura 59 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....              | 144 |
| Figura 60 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....              | 144 |
| Figura 61 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....              | 146 |
| Figura 62 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....              | 146 |
| Figura 63 - Saída 1, Ajuste Grosso PI.....                      | 150 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 64 - Saída 2, Ajuste Grosso PI.....                              | 150 |
| Figura 65 - Saída 1, Ajuste Fino PI .....                               | 152 |
| Figura 66 - Saída 2, Ajuste Fino PI .....                               | 152 |
| Figura 67 - Saída 1, Ajuste Grosso PID .....                            | 156 |
| Figura 68 - Saída 2, Ajuste Grosso PID .....                            | 156 |
| Figura 69 - Saída 1, Ajuste Fino PID.....                               | 159 |
| Figura 70 - Saída 2, Ajuste Fino PID.....                               | 159 |
| Figura 71 - Região de Estabilidade, Dados do Alves (1988) e Autor. .... | 161 |
| Figura 72 - Saída 1, Ajuste Grosso Proporcional .....                   | 164 |
| Figura 73 - Saída 2, Ajuste Grosso Proporcional .....                   | 164 |
| Figura 74 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....                      | 166 |
| Figura 75 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....                      | 166 |
| Figura 76 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.....                      | 169 |
| Figura 77 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.....                      | 169 |
| Figura 78 - Saída 1, Ajuste Fino PI .....                               | 171 |
| Figura 79 - Saída 2, Ajuste Fino PI .....                               | 171 |
| Figura 80 - Saída 1, Ajuste Grosso PID .....                            | 174 |
| Figura 81 - Saída 2, Ajuste Grosso PID .....                            | 174 |
| Figura 82 - Saída 1, Ajuste Fino PID.....                               | 177 |
| Figura 83 - Saída 2, Ajuste Fino PID.....                               | 177 |

## LISTA DE SIGLAS

|           |   |
|-----------|---|
| GUI –     | <i>Graphical User Interface</i>                             |
| IAE –     | <i>Integral of the Absolute magnitude of the Error</i>      |
| ISE –     | <i>Integral of the Square of the Error</i>                  |
| ITAE –    | <i>Integral of Time multiplied by Absolute of the Error</i> |
| Kp –      | Ganho Proporcional  |
| Kpmáx –   | Ganho Proporcional Máximo                                   |
| PI –      | Proporcional Integral                                       |
| PD –      | Proporcional Derivativo                                     |
| PID –     | Proporcional Integral Derivativo                            |
| PO –      | Percentual de <i>Overshoot</i>                              |
| Ref –     | Valor de Referência (Setpoint)                              |
| SISO –    | <i>Single Input Single Output</i>                           |
| TITO –    | <i>Two Input Two Output</i>                                 |
| TD –      | Tempo de Derivação  |
| Test –    | Tempo de Estabilização                                      |
| TI –      | Tempo de Integração   |
| Tosc –    | Período de Oscilação  |
| Tsubida – | Tempo de Subida   |
| VM –      | Variável Manipulada   |

## LISTA DE APÊNDICES

|  |     |
|--|-----|
| CD-ROM Composto pelo Simulador de Sistemas TITO..... | 183 |
|--|-----|

## 1. INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos as técnicas de controle se tornaram algo muito presente no meio industrial. Para se ter uma ideia da dimensão do uso de controladores PID (Proporcional, Integral e Derivativo), estima-se que estas ações de controle estão implementadas em 96% dos controladores utilizados em diversos processos (Rubaii, 2008). A aplicação desse controlador é bastante ampla e abrange controle de processos como: motores, indústrias automobilísticas, aeroespacial, controle autônomo, robótica, entre outros.

A utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e os métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controles PID se mostram os mais úteis (Ogata, 2010). Atualmente é possível encontrar novas metodologias de controle (sistemas adaptativos, preditivos, lógica fuzzy, inteligência artificial) e mesmo assim, o controlador PID se mostra predominante para o controle de plantas industriais. Essa permanência do controlador PID, após o surgimento de novas técnicas, se dá, principalmente, pelas suas características, dentre elas, a facilidade, simplicidade, aplicabilidade, mas também, por possuir uma arquitetura simples, o que torna muito mais fácil a sua sintonia pelos engenheiros responsáveis, por exemplo.

Mesmo com o seu grande uso, e possuindo uma grande história, a sintonia de controladores PID ainda é uma área ativa de pesquisa bastante desafiadora, tanto acadêmica quanto industrial (Cong & Liang, 2009), como pode ser observado nas recentes publicações de (Shukor, Ahmad & Tumari, 2017) e (Chebli, Elakkary & Sefiani, 2017). Em Cheng (2006) encontram-se informações estatísticas reveladoras sobre a situação dos controladores nas indústrias químicas, papel e celulose, refinarias:

- Controladores do tipo PID são utilizados na imensa maioria das aplicações, por volta de 97%;
- Somente 32% das malhas de controle poderiam ser classificadas como de desempenho excelente ou aceitável;

- Cerca de 32% dos controladores foram classificados como de desempenho regular ou fraco, o que indicava comportamento inaceitavelmente lento ou oscilatório.

Desse forma, pode-se concluir que o controlador PID ainda é e continuará sendo por muitos anos a mais importante estrutura de controle utilizada na indústria (Cologni, 2008).

Assim como a sintonia do controlador PID, análise e projeto de controladores para sistemas com uma entrada e uma saída, também conhecidos como sistemas SISO (*Single Input Single Output*), são vastamente explorados na área de Engenharia de Controle, tanto em nível industrial, quanto em nível acadêmico. Entretanto, em diversos processos industriais a serem controlados, são encontrados sistemas caracterizados com mais de uma entrada ou/e mais de uma saída (Ogata, 2010).

Tendo em vista que sistemas modernos, dotados de muitas entradas e muitas saídas, se tornam cada vez mais complexos, a descrição de um tal sistema também envolverá um grande número de equações. Dessa forma a teoria de controle clássica, que trata somente de sistemas com uma única entrada e uma única saída, tornou-se insuficiente para lidar com sistemas de entradas e saídas múltiplas (Ogata, 2010).

Existem diversas técnicas para resolver o problema do projeto de controladores para sistemas com mais de uma entrada e saída, onde enfatiza-se o uso do processo de desacoplamento. Entretanto, estes métodos apresentam, na maioria das vezes, desvantagens como: alto nível de complexidade e com várias etapas.

Diante deste contexto, o presente trabalho irá abordar a revisão de uma nova metodologia para realizar o controle de sistemas com duas entradas e duas saídas (TITO, do inglês *Two Input Two Output*) utilizando o controlador mais utilizado no âmbito industrial, onde a validação dos dados será executado pelo software Matlab. Assim este trabalho visa contribuir com: a validação da metodologia de Alves (1988), agregar facilidade ao processo de sintonia de controladores PID e permitir que seja possível sua aplicação, o que resultaria em aproveitamento de fato pelos engenheiros que precisam realizar algum ajuste nesses processos.

## 1.1. Motivação

. Segundo Arruda (2008), o problema do baixo desempenho é, em muitos dos casos, resultante de uma sintonia pobre devido:

- Grande variedade de estruturas de controladores PIDs existentes, as quais levam a erros na aplicação das regras de sintonia;
- Ausência de conhecimento dos operadores e engenheiros.

Por falta de conhecimento ou pela dificuldade de empregar as metodologias que já estão disponíveis os processos apresentam comportamentos oscilatórios ou lentidão.

Como foi possível observar há um déficit por parte dos engenheiros em realizar um ajuste adequado e contribuir com o resultado mais eficaz do sistema utilizado.

Diante disso, surge a possibilidade de fornecer a esses profissionais uma alternativa simples de realizar dois níveis de ajustes no processo, alterando apenas parâmetros bases do controlador PID.

## 1.2. Objetivo

O objetivo inicial desse trabalho é demonstrar a efetividade da técnica de ajuste do controle PID proposta por Alves (1988) em sistemas TITO. A técnica é implementada utilizando o software *MATLAB* a fim de obter dados confiáveis para para confrontar com os resultados obtidos pelo autor que na época fez o uso de um computador XT 2002 da Microtec, com a utilização da linguagem de programação Pascal e desde então nunca mais houve uma comparação ou discursão sobre a efetividade de seus dados encontrados.

O outro ponto traçado, além da demonstração da viabilidade da técnica proposta por Alves (1988) utilizando ferramentas atuais de desenvolvimento e simulação, é a vantagem na execução da metodologia se comparado com outras que estão disponíveis e requer do usuário, um amplo entendimento de controle

teórico para ser implementado os ajustes. Para contribuir ainda mais com os usuários que precisam fazer os ajustes nesse tipo de sistema, foi criado um Simulador que facilita a visualização prática do que o ajuste faz com o sistema, otimizando assim o tempo na implementação da metodologia proposta. O desenvolvimento desse trabalho visa o agrupamento da teoria e a possibilidade de ser aplicado na prática.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2 apresenta-se uma visão ampla de controle, dos controladores PID e sobre algumas regras de sintonia.

O capítulo 3 descreve sobre o *software* utilizado na construção dos cálculos e simulações, além disso, informa também sobre o simulador criado para potencializar a aplicação da metodologia proposta.

O Capítulo 4, apresenta-se o desenvolvimento prático do trabalho com aplicação da metodologia desenvolvida pelo Isermann (1981), e, os resultados visuais e quantitativos dos dados gerados.

O Capítulo 5 demonstra a aplicação da metodologia proposta por este trabalho.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões pertinentes ao emprego da metodologia aplicada.

## 2. Princípios Gerais de Controle

O sistema de controle pode ser definido como um dispositivo capaz de modificar o comportamento do sistema por meio de computação e atuação (Murray, 2003). Para entendimento amplo, o controle em malha fechada, como pode ser observado na Figura 1, tem como principal função interpretar a realimentação como uma ferramenta que faz o gerenciamento de incertezas que podem ser paramétricas causadas por fatores como o funcionamento do processo e sinais externos (como perturbações e ruídos) que não são controlados.

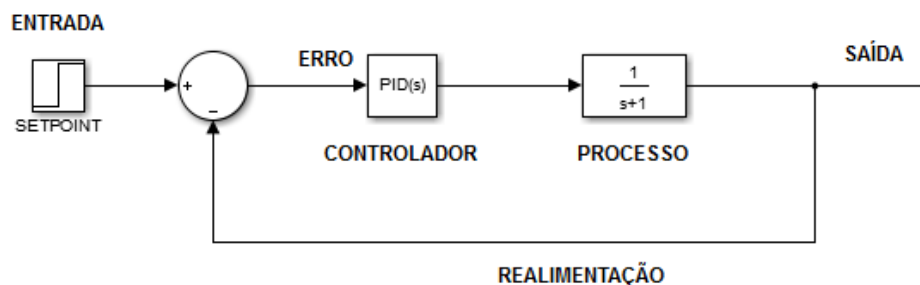


Figura 1 – Controle de Malha Fechada

Fonte: Autor.

Para se adquirir a gerência de qualquer processo é necessário que o controlador esteja a todo o momento recebendo informações do sistema em questão. O controle de malha fechada é composto por uma realimentação que leva até o controlador utilizado o valor correspondente da saída do processo e quando esse valor não for semelhante ao valor de referência (setpoint), o controlador atuará realizando uma compensação a fim de atingir os parâmetros de entrada corrigindo assim os erros.

Dependendo da técnica aplicada, o controle do sistema pode ser mais eficaz em relação à outra metodologia e tipo de controlador empregado, mas todas elas têm como objetivo central:

- Garantir o máximo de estabilidade no sistema;
- Garantir que o valor de saída se mantenha o mais próximo do valor desejado;
- Otimizar a resposta do processo;

- Suprimir as variáveis que interferem na harmonia do controle, as perturbações.

Assim como há diferentes tipos de controladores há também diferentes tipos de sistemas, e para o andamento deste trabalho é necessário distingui-los.

Sistemas que possuem apenas uma única entrada e uma saída são denominados de SISO, conforme a figura 4. São sistemas onde se utiliza a entrada que possui maior influência na saída para a realização do controle. Alguns exemplos de sistemas SISO podem ser visto nas figuras 2 e 3.

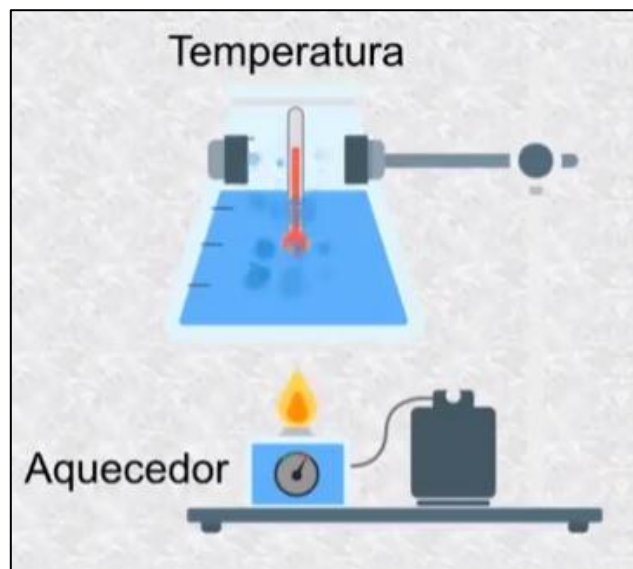


Figura 2 – Sistema de Temperatura  
Fonte: Coursera/ITA (2017).

Para o sistema de temperatura demonstrado pela figura 2, a entrada seria o ajuste do aquecedor e a saída à própria temperatura. As demais variáveis que englobam o processo são denominados de perturbações, pois não seria possível conseguir realizar os seus ajustes com esse tipo de sistema.

E em outro sistema, visto na figura 3 nos mostra o sistema de nível de água, sendo que a sua entrada seria o fluxo de água e a saída a variável nível.

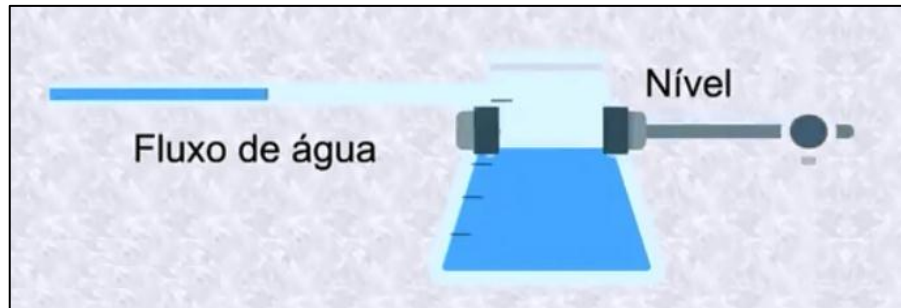


Figura 3 – Sistema de Nível  
Fonte: Coursera/ITA.

O sistema SISO é o sistema mais simples para realização do controle, pois requer apenas o ajuste de um único parâmetro, como foi demonstrado.



Figura 4 - Sistema SISO  
Fonte: Autor.

Esse modelo já foi vastamente estudado e possui inúmeras referências literárias (Ziegler & Nichols, 1942) para se conseguir atingir o ajuste. Neste trabalho será abordado um modelo mais complexo, o sistema TITO que poderá ser visto mais adiante.

## 2.1. CONTROLADOR PID

Cerca de 90 a 95% de todos os problemas de controle podem ser resolvidos pelo uso do controlador PID (Levine, 1996).

A maioria dos problemas práticos industriais é resolvido com o uso controlador PID e vem demonstrando ao longo dos anos uma notável eficácia e praticidade no controle dos processos industriais. Seus parâmetros são de fácil ajuste e sua construção é adequadamente robusta para o ambiente industrial.

O controlador PID calcula o erro entre a sua variável controlada proveniente da medição do projeto onde ele está empregado e o seu valor referencial, conhecido

também como setpoint ou valor de entrada, e, então, em função deste erro é gerado um sinal de controle de forma a eliminar este desvio.

Os principais controladores que podem ser encontrados na prática são:

- Controlador Proporcional (P);
- Controlador Proporcional e Integral (PI);
- Controlador Proporcional e Derivativo (PD);
- Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

### 2.1.1. Controlador Proporcional (P)

Esse controlador faz com que a ação de controle seja diretamente proporcional ao que é aplicado na entrada, então, pode-se dizer que o erro do controlador é resultado da diferença entre a variável do processo e o valor de referência.

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (2.1)$$

Onde  $K_p$  é o ganho proporcional e,  $e(t)$  referente ao erro do sistema.

Vale ressaltar que a ação proporcional quando aumentada, tende a diminuir o erro, entretanto, quanto maior é o valor do ganho aplicado maior será a oscilação no sistema que pode ocasionar muita das vezes à uma instabilidade.

### 2.1.2. Controlador Proporcional e Integral (PI)

Esse controlador gera a sua saída proporcionalmente ao erro e proporcionalmente à integral do erro. A ação PI é definida pelo seguinte modelo:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int e(t) \quad (2.2)$$

Onde  $T_i$  é o tempo de integração. De acordo com os controladores e determinados processos, esse tempo de integração pode ser dado em segundos, minutos. A principal vantagem para o uso desse controlador é a sua atuação para a eliminação do erro em regime permanente.

### 2.1.3. Controlador Proporcional e Derivativo (PD)

A saída de um processo apresenta, intuitivamente, certa "inércia" com relação às modificações na variável de entrada e por isso faz com que provoque uma mudança considerável na saída da planta somente após um certo tempo (Pinto, 2014). Esse comportamento ocasiona transitórios com grande amplitude e período de oscilação, podendo, em um caso extremo causar respostas instáveis. A ação PD é definida pela equação a seguir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

A ação conjunta proporcional e derivativa faz com que haja a antecipação para que a resposta do processo seja mais rápida.

O  $T_d$  é o tempo de derivação, e assim como  $T_i$  ele pode ser dado em segundos ou minutos dependendo do processo.

### 2.1.4. Controlador Proporcional, Integral e Derivativo

O controlador Proporcional, Integral e Derivativo gera a sua saída proporcionalmente ao erro, à integral do erro e à derivada do erro. A equação (2.4) indica a forma ideal do controlador PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p \frac{1}{T_i} \int e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

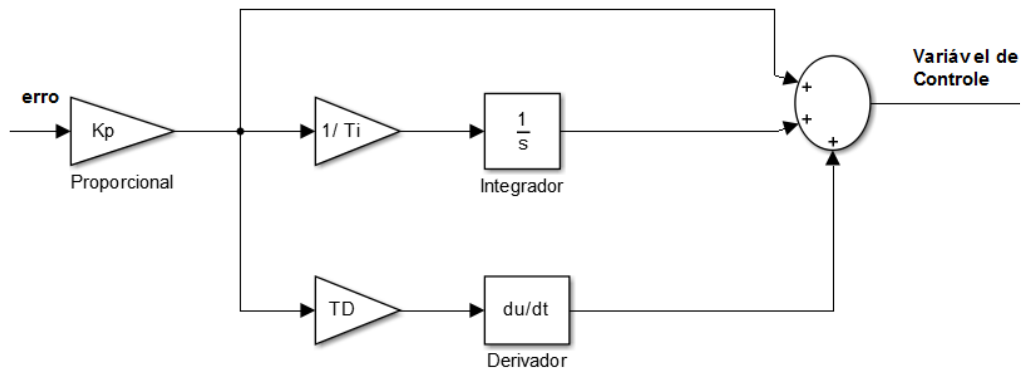


Figura 5 - Estrutura Básica de Controle PID  
Fonte: Autor.

A junção dessas três ações busca melhorar o comportamento transitório e em regime permanente do sistema em questão.

Resumidamente a ação proporcional elimina as oscilações, a integral elimina o desvio de offset, enquanto a derivativa fornece ao sistema uma ação antecipada evitando previamente que o desvio se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio (RIBEIRO, 2005).

## 2.2. Índices de Desempenho Baseados no Erro

Esta seção apresenta índices baseados no erro.

O erro é definido como:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2.5)$$

Onde  $r(t)$  é o valor de referência e  $y(t)$  saída do sistema, no instante  $t$ .

Para fazer a quantificação do erro no processo são utilizados critérios baseados na integral do erro. O primeiro critério que será abordado aqui é o integral do erro - *Integrated Error* - IE:

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt \quad (2.6)$$

No entanto para sistemas oscilatórios ou com pouco amortecimento este índice não satisfaz as necessidades, pois o erro varia entre os valores positivos e negativos podendo ser anulado. Para solucionar esse problema, foi criado outro índice denominado de Integral Absoluta do Erro - *Integrated Absolute Error* - IAE:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.7)$$

Outro critério que foi desenvolvido foi o erro quadrático - *Integrated Square Error* - ISE. Esse índice é indicado para malhas com características menos oscilatórias.

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (2.8)$$

Por fim nós temos o critério que será utilizado como índice de desempenho nesse trabalho, pois ele lida com problemas de quantificação dos erros iniciais em malhas oscilatórias.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (2.9)$$

Poderá ser notado mais adiante que na fase inicial do ajuste do sistema a saída tem um comportamento muito das vezes bastante oscilatório, o que torna coerente o uso do índice Integral do Tempo Multiplicada pelo Erro Absoluto - *Integrated of time Multiplied by Absolute Error* – ITAE.

### 2.3. Critérios de Desempenho

Além do uso do índice de erro, o ITAE, também foi utilizado outros critérios para fazer a verificação quantitativa dos resultados gerados, sendo eles:

- Tempo de Subida ( $T_{sub}$ )  
É o tempo gasto para saída ir de 10% até 90% do valor de referência. É também conhecido como tempo de ascensão.
- Tempo de Estabilização (Test)  
É o tempo gasto para a saída estabilizar a um valor dentro de uma faixa de 95% a 105% do valor de referência. Em algumas literaturas, dependendo do autor, essa faixa é composta por outros valores, mas como esse trabalho têm o objetivo de fazer uma comparação de dados será utilizada a faixa que o autor Alves (1988) utilizou.
- Overshoot (PO)  
É a diferença entre o valor máximo de pico atingido e o valor de referência. Esse valor é dado em percentual.

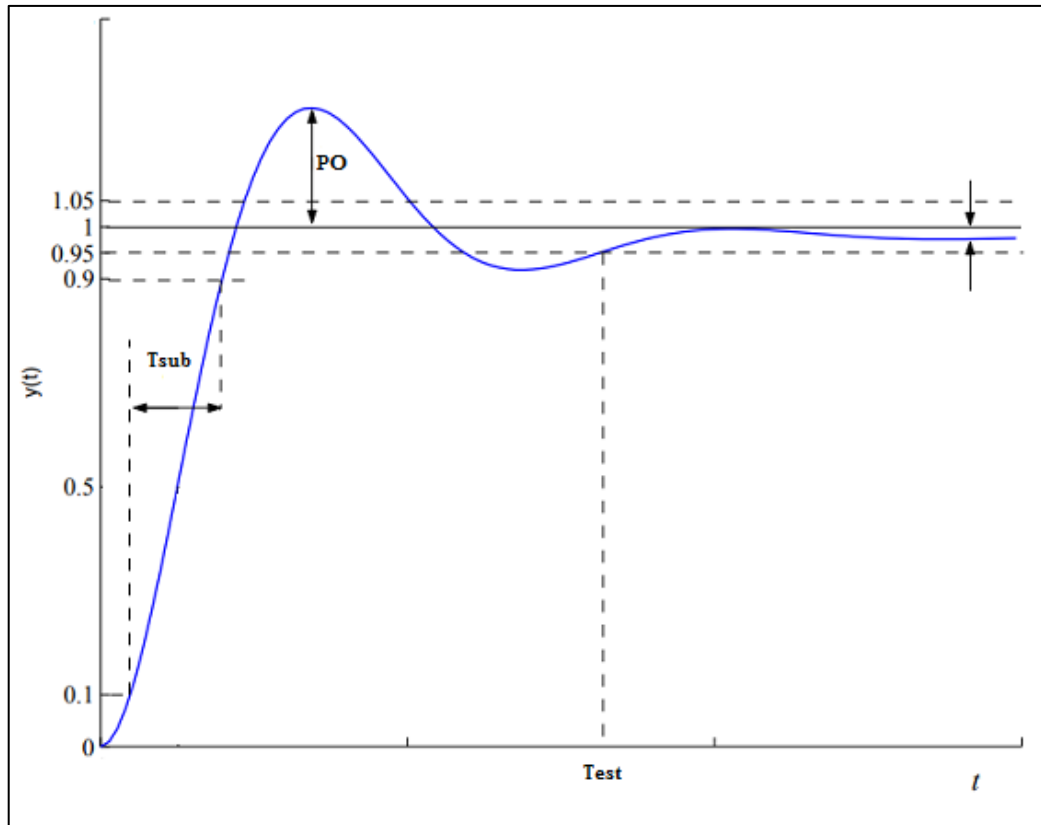


Figura 6 - Critérios de Desempenho  
 Fonte: Ogata (2010), adaptada pelo autor.

## 2.4. Metodologia de Ziegler e Nichols

Os autores Ziegler e Nichols (1942) foram os pioneiros na criação de regras para sintonia de controladores PID. O método desenvolvido por eles consiste em caracterizar a dinâmica do processo alterando parâmetros existentes no controlador PID através de metodologia simples. Mesmo com algumas limitações, como a baixa robustez e amortecimento, essa metodologia de sintonização ainda é muito utilizada pelos fabricantes e usuários que utilizam controladores PID.

Através do artigo “*Optimum Settings for Automatic Controllers*” publicado pelos autores, nasceu a metodologia que seria uma das mais utilizadas para sintonização, mas mais do que isso, também popularizou e permitiu a ascensão dos controladores PID em diversos meios. As regras de sintonia de Ziegler-Nichols são vastamente utilizadas em controle de processos onde não é possível identificar a dinâmica da planta, por essa característica se torna uma regra extremamente útil e

que engenheiros de campo podem a todo o momento adotar como medida de ajuste.

O método descrito por Ziegler e Nichols (1942) diz que deve-se começar aumentando o  $K_p$  de um valor mínimo até um valor máximo. Esse valor máximo ( $K_{p\text{máx}}$ ) é referente ao ponto onde o ganho sofre uma oscilação constante e de mesma amplitude. O valor de  $T_I$  tende ao infinito e o valor de  $T_D$  deve ser igual à zero.

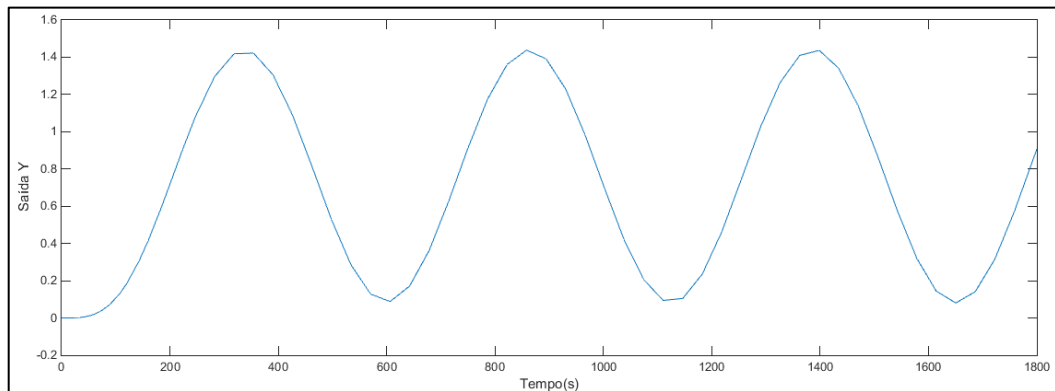


Figura 7 - Limite de estabilidade de um sistema de malha fechada.  
Fonte: Autor.

Quando todos os valores do ganho máximo estiverem sido obtido, só restará adotar o quadro 01 criado por Ziegler e Nichols.

| Controlador | $K_p$                       | $T_I$     | $T_D$   |
|-------------|-----------------------------|-----------|---------|
| P           | $0.5 \cdot K_{\text{máx}}$  |           |         |
| PI          | $0.45 \cdot K_{\text{max}}$ | $T_p/1.2$ |         |
| PID         | $0.6 \cdot K_{\text{max}}$  | $T_p/2$   | $T_p/8$ |

Quadro 1 - Parâmetros do Controlador

Fonte: Ziegler & Nichols (1942), adaptado pelo autor.

Ziegler e Nichols (1942) também desenvolveram outro método, onde é analisada a curva de resposta ao degrau unitário que pode ter um aspecto de um “S” e com isso é possível obter a função de transferência observando o gráfico, e por fim, aplica-se outra maneira para ajustar os parâmetros. Entretanto, esse método não será utilizado nesse trabalho, visto que, o objetivo será desenvolver o ajuste

sem que seja possível ter conhecimento sobre o modelo do processo que será controlado.

## 2.5. O Controlador PID Multivariável

São denominados dessa maneira, em razão das suas múltiplas entradas e saídas, e será referido aqui como TITO, visto que o presente trabalho foi desenvolvido em cima de duas entradas e duas saídas, conforme a figura 8. O sistema TITO oferece um grau de interação com cada controlador, como demonstrado na figura 9 e acaba impactando sobre todas as variáveis do sistema, por isso, realizar o ajuste em cada controlador é uma tarefa desafiadora no que diz respeito o campo do controle avançado.

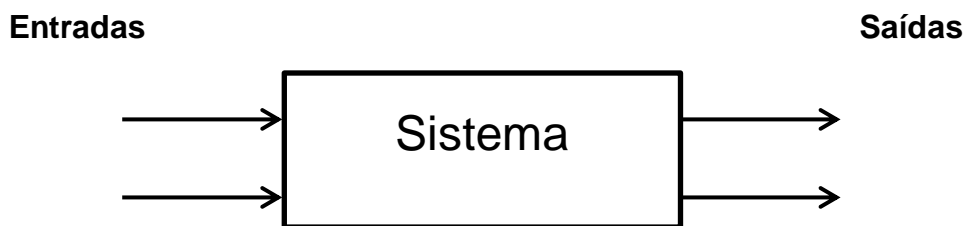


Figura 8 - Sistema TITO  
Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente, em sistemas TITO adota-se dois controladores iguais (PID1 e PID2), como está representado na figura 9, e cada bloco PID é composto pela estrutura mostrada na figura 5.

A metodologia para o ajuste de controladores PID multivariável é muito semelhante ao método empregado para o caso de controladores monovariáveis, como o de Ziegler e Nichols (1942), uma vez que estes métodos constituem a base utilizada por muitos estudiosos, no desenvolvimento de procedimentos de ajustes para controles que possuem mais de uma variável a ser controlada (ALVES, 1988).

Esse trabalho utilizou a metodologia de ajuste proposta pelo Alves (1988), que utiliza o conceito de região de estabilidade em seu desenvolvimento.

## 2.6. Metodologia de Isermann

Isermann (1981) propõe um método que têm como princípio a escolha dos parâmetros do controlador, de modo que esses valores mantenham o sistema a uma distância adequada do limite de estabilidade.

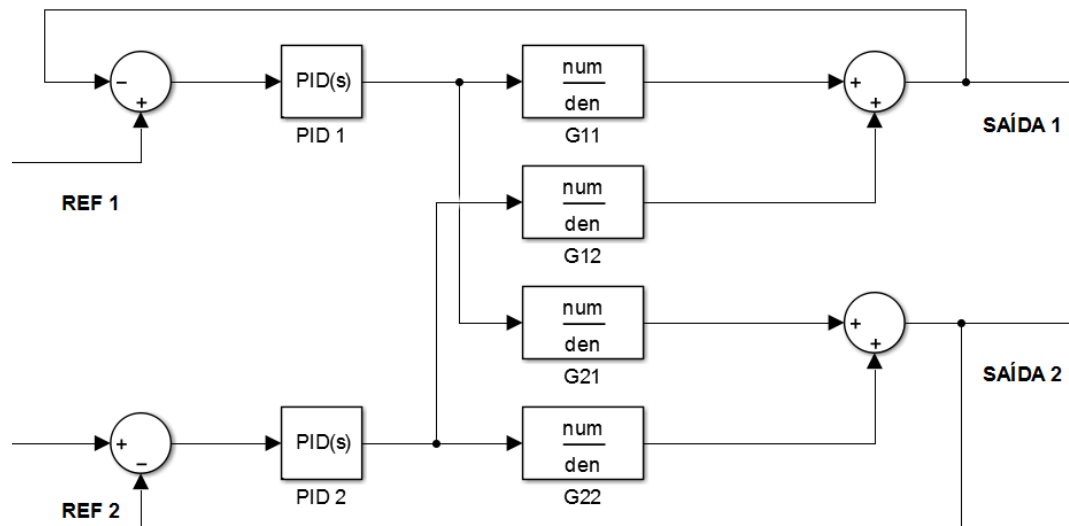


Figura 9 - Estrutura do Controle TITO estudada.

Fonte: Alves (1988), adaptada pelo autor.

A figura 9, que representa a estrutura implementada e usada no trabalho, ilustra sobre a simetria do processo. Quanto à simetria, existem dois tipos: simétrico representado por  $G_{11}$  igual a  $G_{22}$  e  $G_{12}$  igual a  $G_{21}$  e pode ser do tipo assimétrico onde uma das igualdades – do sistema simétrico descrita acima – representadas não são verdadeiras.

É bom ressaltar que os sinais das funções de transferência não devem ser contados.

Será abordado também o fator de acoplamento estático definido pelo Isermann (1981), onde obtém-se:

$$X_o = \frac{K_{12} K_{21}}{K_{11} K_{22}} \quad (2.10)$$

Onde os ganhos estáticos das transferências serão  $K_{11}$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{21}$  e  $K_{22}$ .

O acoplamento estático pode ser positivo quando o valor de  $X_o$  for maior que zero ( $X_o > 0$ ) e negativo quando o valor de  $X_o$  for menor que zero ( $X_o < 0$ ).

Para determinar os valores dos ganhos  $K11$ ,  $K12$ ,  $K13$  e  $K22$  fará uso da seguinte fórmula:

$$K_{ij} = \lim_{s \rightarrow 0} G_{ij}, \text{ sendo } i, j = 1 \text{ e } 2 \quad (2.11)$$

### 2.6.1. Região de Estabilidade

Para ter o pleno conhecimento sobre a região de estabilidade deve-se imaginar um plano cartesiano formado por  $Kp1$  (valor referente ao eixo y) e  $Kp2$  (valor referente ao eixo X), conforme demonstrado na figura 10, quando ocorre uma alteração desses valores de ganho, modifica também a estabilidade do sistema.

A adição de uma ação diferenciadora num controle PI aumenta a região de estabilidade. E uma ação integradora ocasiona a diminuição (Alves, 1988).

Para figura 11 será considerado:

$$KR11k = Kp1 = Kp1c;$$

$$KR11D = Kp1';$$

$$KR22C = Kp2' = Kp2c;$$

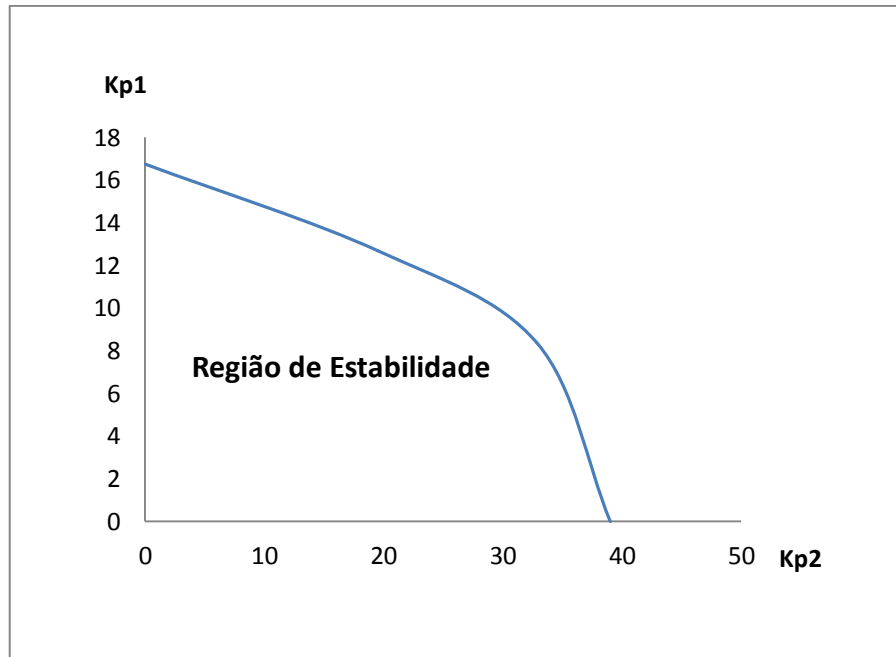


Figura 10 - Região de Estabilidade  
 Fonte: Alves, Guedes (1988), adaptada pelo autor.

Isermann (1981) considera quatro tipos de regiões de estabilidade quanto à simetria do processo e o fator de acoplamento estático, conforme mostrado na figura 11.

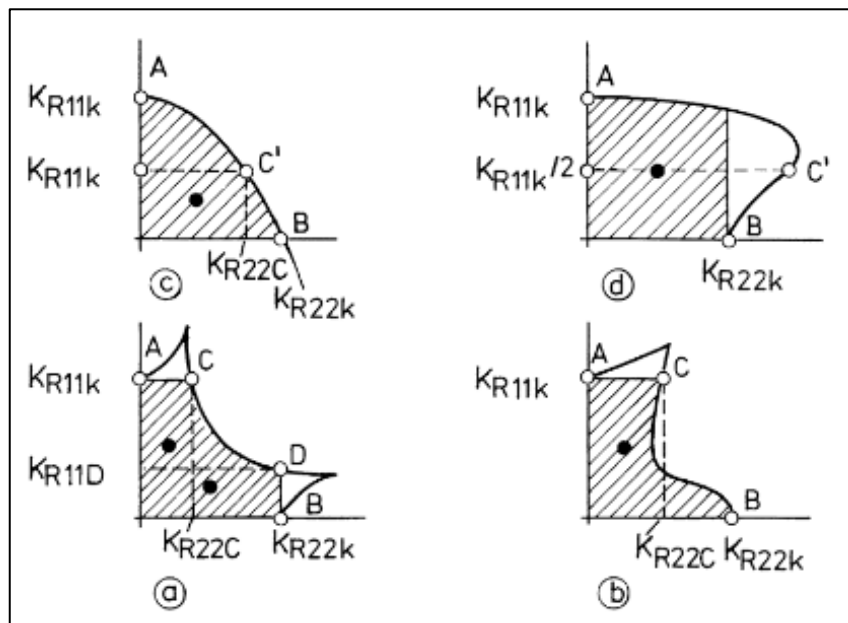


Figura 11 - Regiões permissíveis de ganhos dos controladores para sistema de duas entradas e duas saídas  
 Fonte: Isermann (1981).

Onde as imagens correspondem à região:

- (a) Simétrico e fator de acoplamento negativo;
- (b) Assimétrico e fator de acoplamento negativo
- (c) Simétrico e fator de acoplamento positivo
- (d) Assimétrico e fator de acoplamento positivo

Desse forma, pode-se afirmar que a região “a” possui simetria quanto ao eixo de  $K_{p1}$  e  $K_{p2}$  e é composto por uma faixa de valores de  $K_{p2}$  que tornam o sistema estável quando o valor de  $K_{p1}$  é máximo e vice-versa.

Já na região “b” observa-se quando  $K_{p1}$  é máximo, existem valores onde  $K_{p2}$  está fora da área de estabilidade e também pode-se afirmar que quando  $K_{p2}$  é máximo, possuem valores de  $K_{p1}$  onde não satisfaz a área de estabilidade do sistema.

Dando seguimento, ao analisar a região “c” onde pode-se dizer que ele é simétrico, entretanto não é possível afirmar que sempre haverá valores que irá atender a estabilidade do sistema.

Por fim a última região “d” é um sistema assimétrico e para todo valor máximo de  $K_{p2}$  sempre irá possuir valores que atendem  $K_{p1}$  fazendo assim, com que haja estabilidade do sistema.

### **2.6.2. Método de Isermann**

Para iniciar o método descrito por Isermann (1981), deve-se determinar os pontos que delimitam a área de estabilidade, para isso, deve-se:

- 1– Utilizar apenas o controlador proporcional;
- 2– Determinar o valor de  $K_{p2}$  sendo igual a 0 e aumentar gradativamente o valor de  $K_{p1}$ , para que possa observar o seu valor crítico. Ocorrendo isso, chamamos esse valor máximo de ponto A;

3– Faremos agora o processo inverso, deve-se determinar o valor de  $Kp1$  sendo igual a 0 e aumentar gradativamente o valor de  $Kp2$  até que ele atinja seu valor máximo, feito isso, dizemos que esse valor é o ponto B;

4– Adota-se  $Kp1$  sendo igual a  $Kp1c$  e aumenta o valor de  $Kp2$  até que seja encontrada uma oscilação constante e de mesma amplitude, obtém-se então o ponto C que será usada nas regiões “a” e “b”, referente à figura 11;

5– Caso nenhuma estabilidade ocorra, deve-se adotar  $Kp1$  sendo a metade de  $Kp1c$ , onde se obtém o ponto C’ que será usado nas regiões “c” e “d”, referente à figura 11;

6– E por fim, para determinarmos o valor do ponto D, da região “a”, deve-se fazer novamente o processo 4 só que dessa vez adotamos  $Kp2$  sendo igual a  $Kp2c$ .

O próximo passo é determinar os valores do ganho de  $Kpi$  para os controladores proporcionais, de acordo com a região:

1– Na região “a”, é possível determinar o valor do ganho para o controlador proporcional de acordo com a resposta da saída, isso significa dizer que, caso a primeira saída tenha maior importância obtém-se que adotar a seguinte fórmula:

$$Kp1 = 0.5 * Kp1c \quad (2.12)$$

$$Kp2 = 0.5 * Kp2' \quad (2.13)$$

Entretanto, se a segunda saída for mais solicitada pelo usuário, utilizamos:

$$Kp1 = 0.5 * Kp1'' \quad (2.14)$$

$$Kp2 = 0.5 * Kp2c \quad (2.15)$$

2– Para a segunda região que é a “b”, utilizaremos as seguintes equações:

$$Kp1 = 0.5 * Kp1c \quad (2.16)$$

$$Kp2 = 0.5 * Kp2' \quad (2.17)$$

3– Seguindo, na região “c” fica:

$$Kp1 = 0.25 * Kp1c \quad (2.18)$$

$$Kp2 = 0.5 * Kp2' \quad (2.19)$$

4– E por fim, a última região “d”:

$$Kp1 = 0.5 * Kp1c \quad (2.20)$$

$$Kp2 = 0.5 * Kp2c \quad (2.21)$$

Uma vez terminada a determinação dos ganhos proporcionais, será dado seguimento para o ajuste de outro controlador, que é o PI (proporcional-integral). Resumidamente, os valores dos ganhos nesse controlador são os mesmos dos utilizados no proporcional. O parâmetro a ser modificado, neste caso, é o tempo de integração, que será obtido da seguinte maneira:

$$TI = 0.85 * Tpic \quad (2.22)$$

Onde temos que  $T_{pic}$  é o valor do período das oscilações nos pontos limites de estabilidade, A para  $i=1$  ou B para  $i=2$ .

E por fim, temos a última etapa que é a escolha dos parâmetros para os controladores PID:

$$Kpi (PID) = 1.25 * Kpi (P) \quad (2.23)$$

$$Tli (PID) = 0.5 * Tli (PI) \quad (2.24)$$

$$TDi (PID) = 0.25 * Tli (PID) \quad (2.25)$$

Assim encerra-se o desenvolvimento da metodologia de Isermann, vale a pena ressaltar que essa metodologia, assim como outras, é difícil atingir um ajuste satisfatório, pois em várias ocasiões necessitará de uma correção mais minuciosa.

Para realizar o uso do método, utilizou-se uma ferramenta muito requisitado na engenharia, o Matlab, que possibilitou a implementação do sistema, e também, sua simulação. Com isso é possível efetuar as simulações baseada pela

metodologia desenvolvida por Isermann (1981) e os ajustes propostos pelo Alves(1988), e verificar a discrepância dos resultados, comparando as metodologias.

### **3. MATLAB**

O Matlab foi desenvolvido no fim dos anos 1970 por Cleve Moler, na época ele era o atual presidente do departamento de ciências da computação da Universidade do Novo México. Ele logo se espalhou para outras universidades e encontrou um forte uso no âmbito da comunidade matemática aplicada. Jack Little, um engenheiro, conheceu a linguagem Matlab durante uma visita feita por Moler à Universidade de Stanford em 1983 e, reconhecendo o seu potencial comercial, juntou-se a Moler e Steve Bangert. Os três reescreveram o Matlab em C, em 1984 fundaram a MathWorks e prosseguiram no seu desenvolvimento. O software foi adotado pela primeira vez por engenheiros de projeto de controle, a especialidade de Little, e rapidamente se espalhou para outros campos de aplicação. Agora, é também utilizado nas áreas da educação, em especial no ensino da álgebra linear e da análise numérica, e são muito popular entre os pesquisadores, matemáticos e cientistas envolvidos com processamento de imagem, gerenciamento e simulação de diversos processos.

O Matlab é um ambiente computacional técnico de alto nível apropriado para resolver problemas científicos e de engenharia (Nise, 2012).

Anteriormente, a metodologia desenvolvida pelo Alves (1988), o autor criou um simulador no microcomputador XT 2002 da Microtec e a linguagem usada foi Pascal, mais preciso o Turbo Pascal. Foi optada pelo autor pela sua facilidade de programação e os recursos oferecidos na época.

Para o desenvolvimento desse trabalho será utilizado o software Matlab que é uma ferramenta amplamente utilizada na engenharia e foi manuseado para atender os critérios que a metodologia necessita.

#### **3.1. Graphical User Interfaces**

O Simulink é utilizado para realizar simulações de sistemas. Ele utiliza uma interface gráfica de usuário (graphical user interface – GUI) que permite a modelagem de sistemas através de diagramas de blocos. Com ele, é possível

efetuar mudanças nos blocos, tais como, o tamanho, seu nome, a ligação entre outros blocos e demais alterações.

Realizar modificações diretas nos blocos do Simulink e depois executar a simulação e por fim uma correção faz com que o tempo gasto seja muito significativo e realizar múltiplas análises em diversos processos faz com que esse tempo aumente ainda mais, por isso, visando à otimização e o melhor aproveitamento, foi criado uma GUI que nos permite entrar com os parâmetros dos controladores PID no sistema TITO e o tempo de simulação, fazer a simulação das duas saídas simultaneamente, comparar e realizar a correção caso necessário.

A figura 12 apresenta o resultado da interface proposta, onde é possível notar os campos destinados aos valores de ganho ( $Kp1$  e  $Kp2$ ), tempo de integração ( $Ti1$  e  $Ti2$ ), tempo de derivação ( $Td1$  e  $Td2$ ), o tempo que será simulado (tempo de simulação) e o espaço para alocar o numerador e denominador das funções de transferência que descreve o sistema TITO a ser simulado. Pode-se analisar ainda dois espaços, no centro do simulador, destinados aos gráficos que serão gerados a partir das saídas 1 e 2, e, alguns resultados provenientes da programação interna, que faz a captação dos dados gerados pela simulação e são demonstrados diretamente ao usuário.

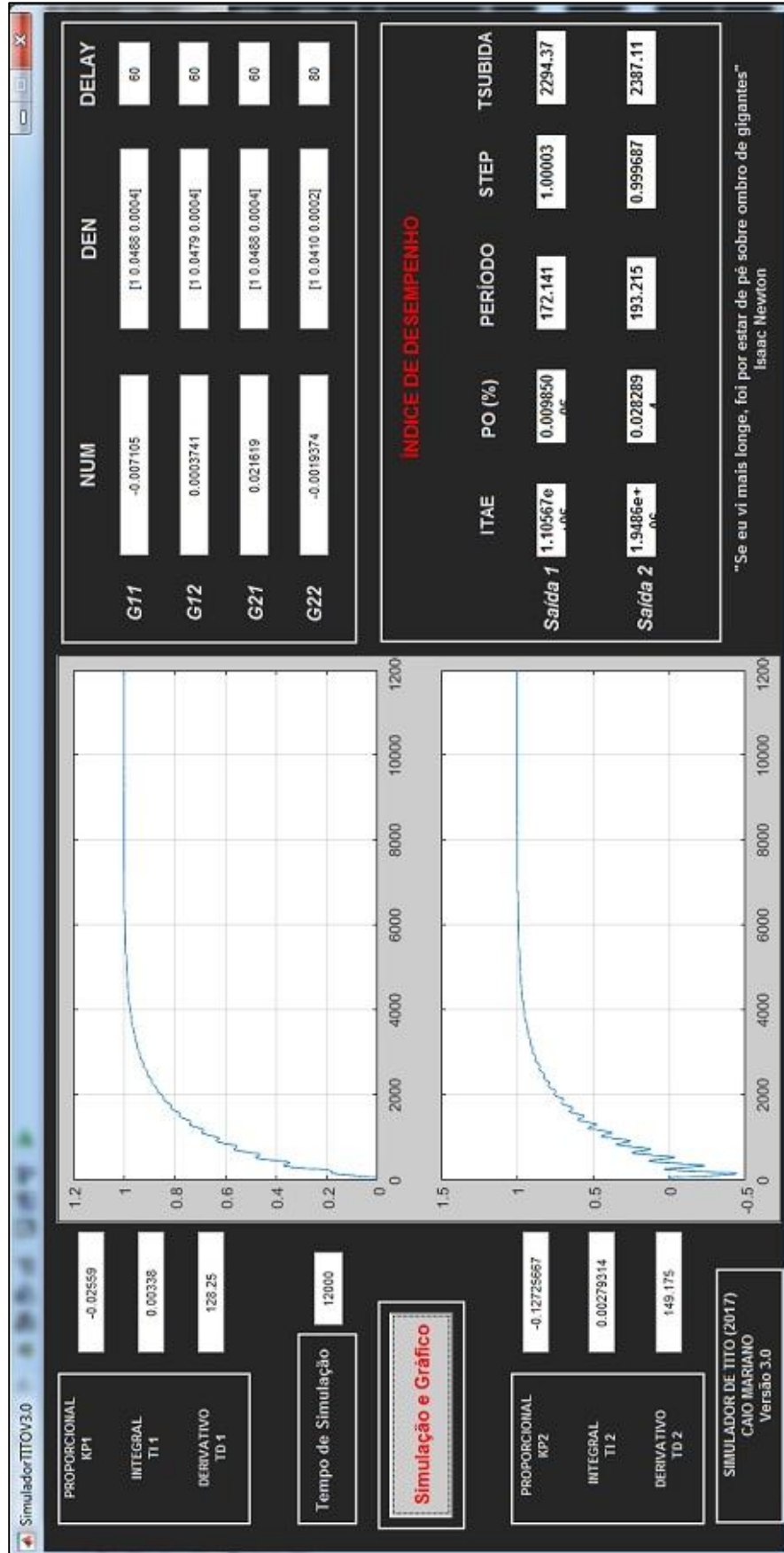


Figura 12 - GUI, Simulador criado pelo Autor  
 Fonte: Autor.

### 3.2. Especificações da Saída

Depois que o usuário entrou com os dados no sistema de controle e efetuou a simulação, é possível obter os resultados.

Como já foram demonstrados anteriormente, alguns índices de desempenho são demonstrados automaticamente ao usuário após ele dar início à simulação. Cada saída possui de forma individual o seu *slot* de resultados que são: *ITAE*, o sobressinal, período de oscilação da saída do processo, tempo de subida e o valor da saída quando aplicado um degrau unitário. Além de mostrar na tela o gráfico com o comportamento do sistema. Os gráficos estão dispostos dessa maneira intencionalmente, visto que, em sistemas TITO a alteração de um parâmetro influencia em todo o processo, em outras palavras um aumento ou decréscimo, por exemplo, do sobressinal de uma saída irá impactar diretamente no resultado da outra saída.

Para fazer uma análise do que está ocorrendo nas saídas do sistema, basta o usuário fazer uma inspeção visual direto na tela da GUI e interpretar o fenômeno de como a saída se comporta. Quanto ao seu comportamento, as saídas podem estar com oscilações, lentas ou de acordo com o esperado pelo usuário.

Os índices de desempenho e resultados também devem ser utilizados caso a inspeção visual, somente, não seja suficiente.

Visando com que o desempenho do sistema fique quantitativamente melhor para se obter uma avaliação real e para reduzir a contribuição de grandes erros iniciais no valor da integral de desempenho, enfatizando os erros que acontecem mais tarde na resposta, a metodologia proposta utiliza do índice de desempenho *ITAE*, como forma de escolha do ponto de partida, de modo que esse índice seja o menor possível. O não uso de um dos índices implica na escolha de um ponto arbitrário que poderia apresentar demasiados acúmulos de erros e outras variâncias que nós pretendemos evitar no controle de qualquer processo.

### 3.3. Composição e Utilização do Simulador

Para realizar a simulação, o usuário precisa tomar algumas ações simples que permitirá que ele consiga fazer o ajuste em sistemas multivariáveis. O primeiro passo é abrir o software Matlab e em seguida procurar pela pasta que nesse trabalho foi denominada de “Simulador\_Final”. Nessa pasta encontram-se três arquivos disponíveis no *CD-Rom* que acompanha esse trabalho, os arquivos são:

- 1) “gui\_tito.slx” que têm todas as ligações dos blocos composta no Simulink conforme a Figura 9;
- 2) o arquivo denominado de “tito.m” que possui toda a parte de programação que será usada neste trabalho, isto é, o arquivo que traz o código que gera a interface gráfica e que faz a ligação entre os controles o simulador e o modelo implementado em Simulink e também os cálculos descritos pelas equações 2.4, 2.5 e 2.9.
- 3) o arquivo que permite manipular a interface através de uma janela gráfica, em vez de utilizar linhas de código para tal finalidade, este arquivo é denominado “tito.fig”.

Para executar o simulador, o usuário tem duas opções. A primeira é dar um duplo clique no arquivo “tito.m” isso fará com que o Matlab abra uma aba(o Editor) demonstrando toda a programação. Desta forma, basta ir à aba superior do Matlab e mandar executar, clicando no botão “Run” ou chamando um atalho apertando o “F5”, assim a interface gráfica apresentada na figura 12 deve aparecer. O simulador estará pronto para ser utilizado. O usuário pode ir ainda pelo método mais simples, que é dar um duplo clique no arquivo “tito.fig” e a figura 12 deverá aparecer, estando assim, pronto para realizar ajuste em sistemas TITO.

Antes da simulação o usuário deve entrar com os dados descritos que fazem alusão as funções de transferência que descreve o sistema a ser controlado, conforme a figura 13.

|     | NUM        | DEN               | DELAY |
|-----|------------|-------------------|-------|
| G11 | -0.007105  | [1 0.0488 0.0004] | 60    |
| G12 | 0.0003741  | [1 0.0479 0.0004] | 60    |
| G21 | 0.021619   | [1 0.0488 0.0004] | 60    |
| G22 | -0.0019374 | [1 0.0410 0.0002] | 80    |

Figura 13 - Entrada de Dados do Sistema TITO  
Fonte: Autor.

A figura 13 demonstra o espaço onde serão alocados os dados das funções de transferência pertencentes ao processo. Os espaços do numerador e denominador devem estar entre um colchete e a cada grau de polinômio deve ter um espaçamento. Por exemplo, suponha a função de transferência abaixo:

$$\frac{2s + 10}{24s^4 + 12s^3 + 8s^2 + 4s + 2}$$

Para entrar com os valores dessa função de transferência no simulador, o usuário deve escrever conforme indicado abaixo, sabendo que o número da esquerda é referente o polinômio mais significativo, obtém-se:

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| <b>NUMERADOR</b>   | [2 10]        |
| <b>DENOMINADOR</b> | [24 12 8 4 2] |

Alguns processos possuem delay, que constitui em um atraso do sistema, eles podem ser visto por uma exponencial multiplicando a função de transferência. Para a entrada desse valor o usuário deve colocar apenas o valor referente a esse retardo ignorando o sinal negativo que o descreve e a exponencial. Considere o próximo exemplo:

$$\frac{s + 5}{6s^4 + 14s^3 + 58s^2 + 2} e^{-75s}$$

|                    |               |
|--------------------|---------------|
| <b>NUMERADOR</b>   | [1 5]         |
| <b>DENOMINADOR</b> | [6 14 58 0 2] |
| <b>DELAY</b>       | 75            |

A figura 14 demonstra as lacunas pertencentes ao PID do primeiro e do segundo controlador e que serão preenchidas pelo usuário utilizando o método de ajuste que será descrito mais adiante. Toda mudança de valor pode ser facilmente apagada e reescrita, sem qualquer complicação.

O tempo de simulação é o tempo que o usuário define para fazer a observação do sistema.

The image shows a software interface for adjusting PID controller parameters. It is organized into several sections:

- Top Section:** Contains three input fields for the first controller:
  - PROPORCIONAL KP1: -0.02559
  - INTEGRAL TI 1: 0.00338
  - DERIVATIVO TD 1: 128.25
- Middle Section:** Contains a 'Tempo de Simulação' (Simulation Time) input field set to 12000.
- Simulation Button:** A large button labeled 'Simulação e Gráfico' (Simulation and Graph) in red text.
- Bottom Section:** Contains three input fields for the second controller:
  - PROPORCIONAL KP2: -0.12725667
  - INTEGRAL TI 2: 0.00279314
  - DERIVATIVO TD 2: 149.175
- Footer:** A box containing the text 'SIMULADOR DE TITO (2017) CAIO MARIANO Versão 3.0'.

Figura 14 - Entrada de Dados Para Ajuste do PID  
Fonte: Autor

O simulador criado para o desenvolvimento desse trabalho conta com um único botão, “Simulação e Gráfico”, responsável por todos os resultados esperados. Foi pensado dessa maneira para agregar ainda mais facilidade ao usuário.

Após a simulação será fornecido dois gráficos que descrevem como o sistema se comporta com os valores que foram utilizados na metodologia. Na figura 15 pode-se ver esse comportamento avaliando as saídas, sendo a superior referente à saída 1 e a inferior referente à saída 2. Elas foram dispostas, visualmente falando, de modo que uma fique sobre a outra, pois diferentemente de sistemas SISO, os sistemas TITO uma mudança de uma saída implica diretamente na alteração da outra saída e deste modo é possível notar de forma mais clara.

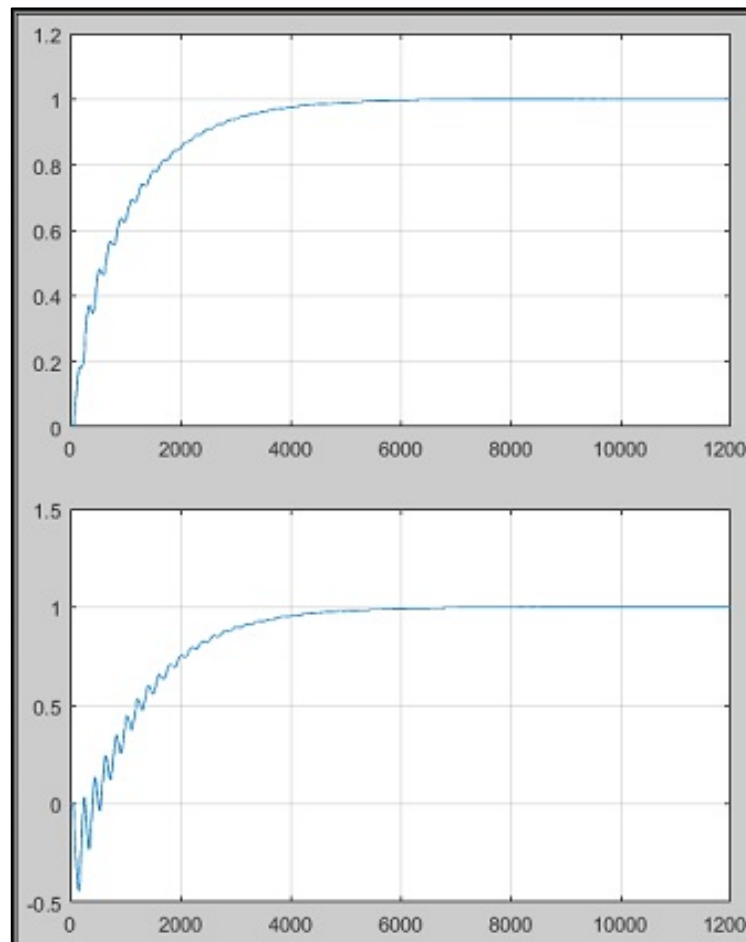


Figura 15 - Gráfico das Saídas 1 e 2  
Fonte: Autor.

Após a entrada dos dados e executado a simulação, o simulador ainda informa ao usuário alguns dados importantes do que está acontecendo em cada saída do sistema. Visando maior comodidade para determinação de alguns aspectos da metodologia de ajuste, a figura 16 demonstra alguns parâmetros que será evidenciado na tela, facilitando ainda mais o critério de comparação, o que resulta na melhor escolha dos ajustes e a captação dos resultados.

| ÍNDICE DE DESEMPENHO |                |                |         |          |         |
|----------------------|----------------|----------------|---------|----------|---------|
|                      | ITAE           | PO (%)         | PERÍODO | STEP     | TSUBIDA |
| Saída 1              | 1.10567e<br>06 | 0.009850<br>06 | 172.141 | 1.00003  | 2294.37 |
| Saída 2              | 1.9486e+<br>06 | 0.028289<br>4  | 193.215 | 0.999687 | 2387.11 |

Figura 16 - Esboço dos Resultados Gerados  
Fonte: Autor.

O erro (ITAE) que foi demonstrado na seção anterior é um importante parâmetro para determinação de pontos e o desempenho do sistema.

O *Overshoot* indica o valor máximo que a saída atinge, ultrapassando assim o valor do sinal de entrada que é a referência.

O período de oscilação agiliza no descobrimento do período de uma saída oscilatória, parâmetro muito importante nas primeiras etapas da metodologia empregada.

O tempo de subida parâmetro muito eficaz para observar o tempo de resposta do processo.

E por fim o *Step* valor que será lido nas saídas, esse valor deve estar o mais próximo possível do valor de entrada do sistema. Em todos os casos foi adotado como valor referência o *Step* sendo igual a um. Todos os valores da entrada aplicados foram de grau unitário.

## 4. Aplicação e Resultados da Metodologia de Referência

### 4.1. Introdução

Neste capítulo serão realizadas algumas simulações com base no método descrito no capítulo 2. E mais adiante será validado o método do Alves (1988) e por fim o ajuste mais detalhado desenvolvido pelo autor.

Com base em tudo isso, será possível extrair os resultados e fazer comparações que apontarão como uma possível opção viável e confiável de ajuste em processos com duas entradas e duas saídas utilizando o controlador PID.

Para servir como base, o quadro 2 demonstra como será feito a captação dos valores das funções de transferência que o processo TITO possui.

|            |            |
|------------|------------|
| <b>G11</b> | <b>G12</b> |
| <b>G21</b> | <b>G22</b> |

Quadro 2 - Esboço das Funções de Transferência do Processo TITO  
Fonte: Autor.

Foram utilizados os parâmetros encontrados no trabalho original de Alves (1988) que serão demonstrados nos quadros a seguir como “Alves Guedes XT 2002”. E esses valores através serão simulados através do Matlab pelo autor deste trabalho e será denominado nos quadros como “Alves Guedes Matlab”, isto é, nesta etapa utiliza-se os mesmos valores encontrados em Alves (1988), mas agora, utilizando a simulação em Matlab.. E, por fim, simulado todas as metodologias desde o início com o software Matlab, esses dados são puramente do autor desse trabalho que será utilizada para comparar os dados das duas situações anteriores. Nesse caso os dados puros do autor serão evidenciados nos quadros como “Autor”.

## 4.2. Simulações utilizando a metodologia de Isermann

### 4.2.1. Primeiro Processo

O primeiro processo segundo Alves (1988) apresenta um comportamento de grande atraso nas funções de transferência, o que dificulta ainda mais o seu controle.

A planta do processo é descrita pelo quadro 03.

|                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| $\frac{15}{1 + 60s} e^{-75s}$ | 0                         |
| $\frac{7}{1 + 60s} e^{-75s}$  | $\frac{-9.3}{(1 + 4s)^2}$ |

Quadro 3 - Primeiro Processo

Fonte: ALVES (1988).

Para a determinação do tempo de simulação que será utilizado no procedimento, o autor ALVES (1988) adotou um valor de 5 minutos que resultou em um tempo de observação de 450 unidades de tempo, lembrando que o computador usado por ele (XT 2002 – Microtec) possuía algumas restrições e o software utilizado nesse trabalho, o Matlab, não possui nenhuma restrição no que diz respeito ao parâmetro de limitação de pontos no gráfico gerado. Mas para efeito de comparação todos os tempos utilizados nos processos serão os mesmos.

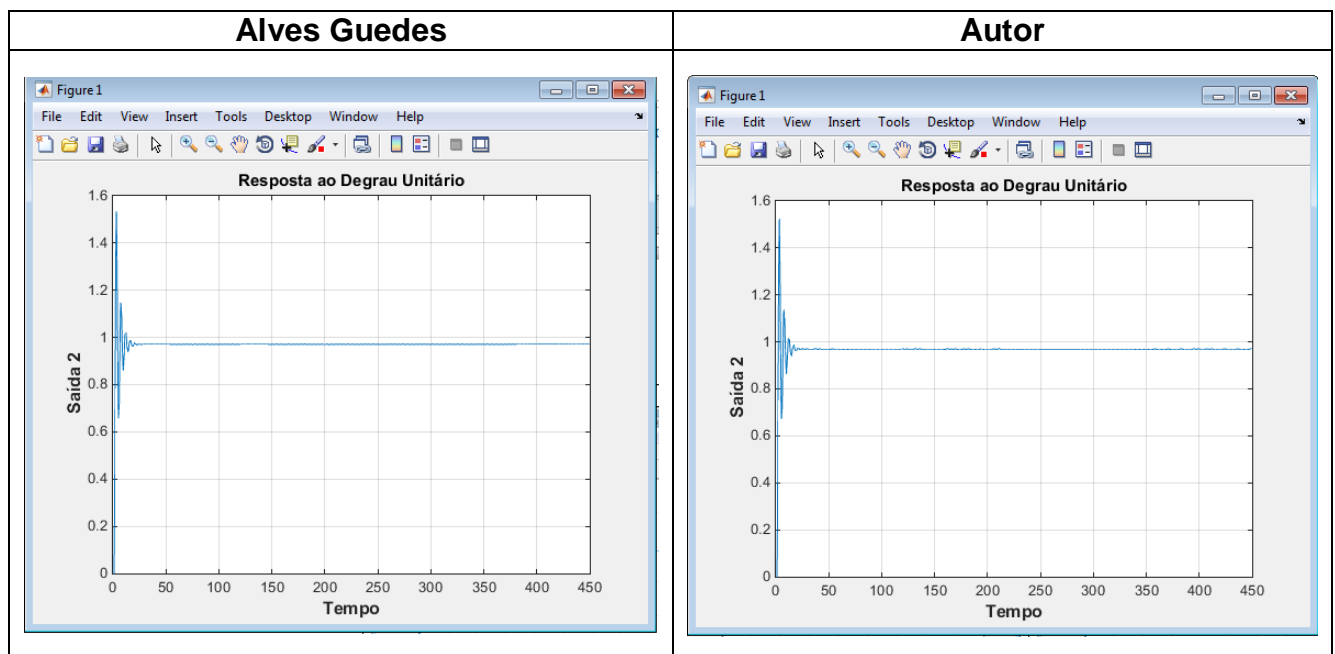
Aplicando o método de Isermann (1981) é possível afirmar que o processo é assimétrico, pois os valores de  $G11$  e  $G22$  não são iguais e o seu acoplamento nulo motivado por  $G12$  ser igual a zero. Entretanto o processo conta com  $G21$  que nos fornece um grau de acoplamento entre a primeira variável de controle e a saída 2. Por isso, ele recebe uma nova classificação, desprezando o valor de  $G12$  na aplicação do cálculo de coeficiente de acoplamento estático, resultando assim na nomenclatura de processo assimétrico com acoplamento negativo.

O próximo passo é a determinação do ponto crítico, o ponto onde ocorre oscilação de mesma amplitude. Faz então  $Kp1 = 0$ , e aumenta gradativamente o valor de  $Kp2$  até que atinja o limite. O resultado quantitativo pode ser observado no Quadro 4 e o gráfico no Quadro 5.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc1</b> |
|---------------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 0          | -3.6       | 4.5          |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0          | -3.6       | 4.05         |
| <b>Autor</b>                    | 0          | -3.4       | 4.18         |

Quadro 4 - Primeiro Parâmetro

Fonte: Autor



Quadro 5 - Resposta do Primeiro Parâmetro

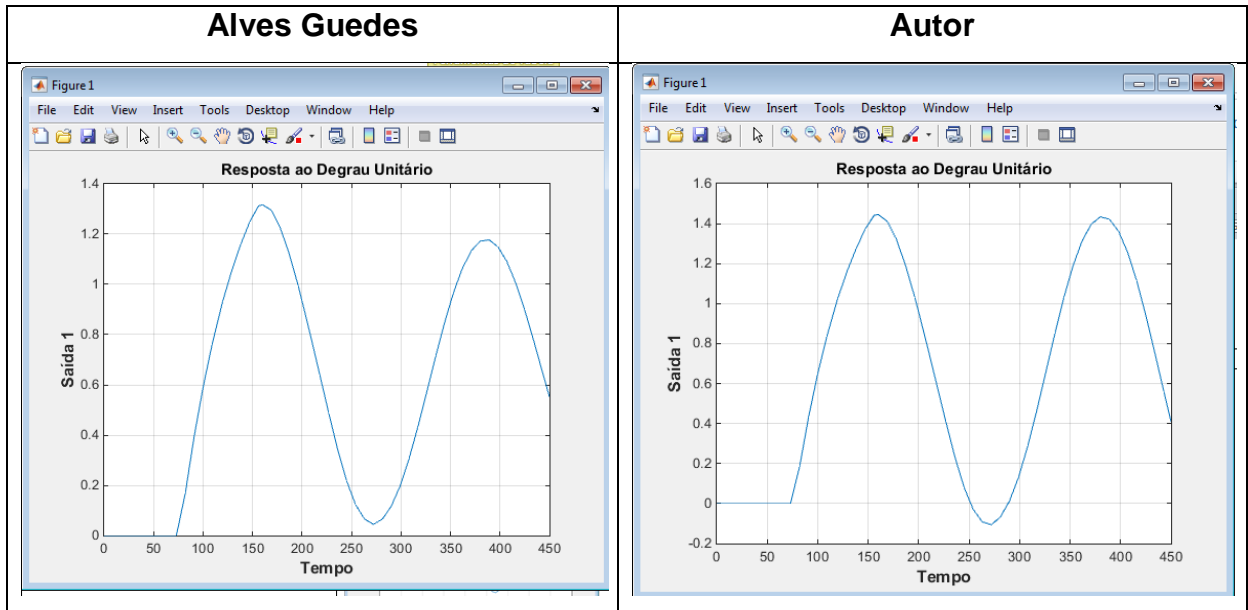
Fonte: Autor

O seguinte passo é o mesmo processo, decreta-se o valor de  $Kp2 = 0$  e varia o  $Kp1$ , os resultados podem ser conferidos nos Quadros 6 e 7.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 0.12       | 0          | 196.5        |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0.12       | 0          | 229          |
| <b>Autor</b>                    | 0.132      | 0          | 220          |

Quadro 6 - Segundo Parâmetro

Fonte: Autor



Quadro 7 - Resposta do Segundo Parâmetro

Fonte: Autor

Aplicando o método de Isermann para o controlador PID, obtive os seguintes valores para o ajuste proporcional apresentadas no Quadro 8 e a região de estabilidade com valores de Alves (1988) na Figura 17 e do autor na Figura 18:

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> |
|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 0.06       | -1.8       |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 0.06       | -1.8       |
| <b>Autor</b>                | 0.066      | -1.7       |

Quadro 8 - Ajuste Proporcional

Fonte: Autor

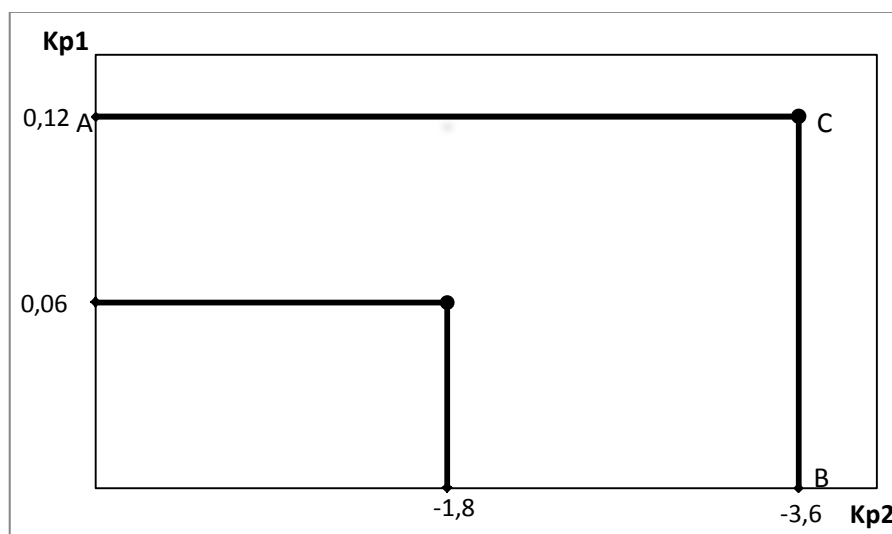


Figura 17 - Método de Isermann. Primeiro Processo, dados do Alves

Fonte: Autor.

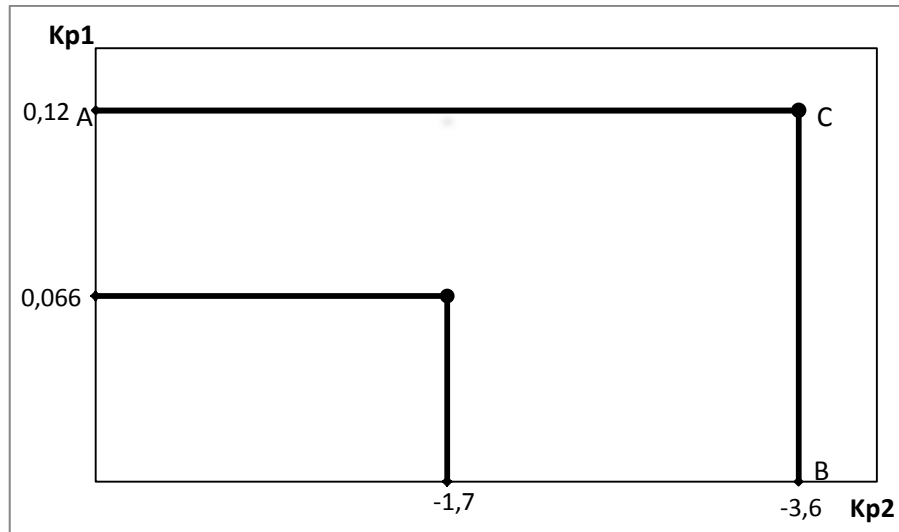
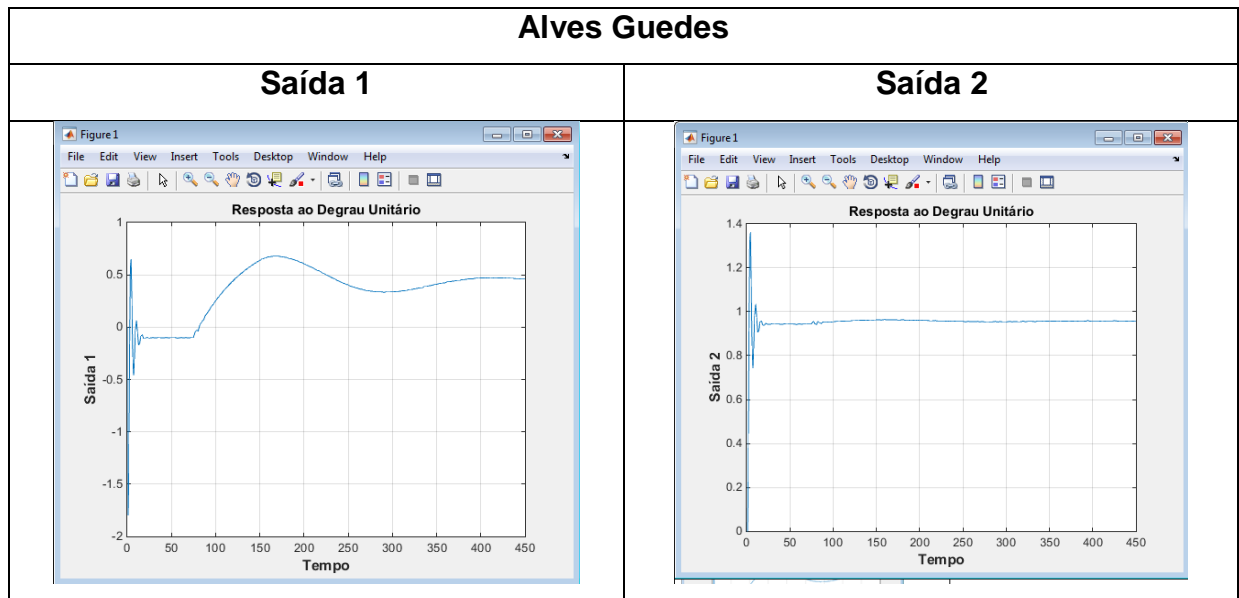
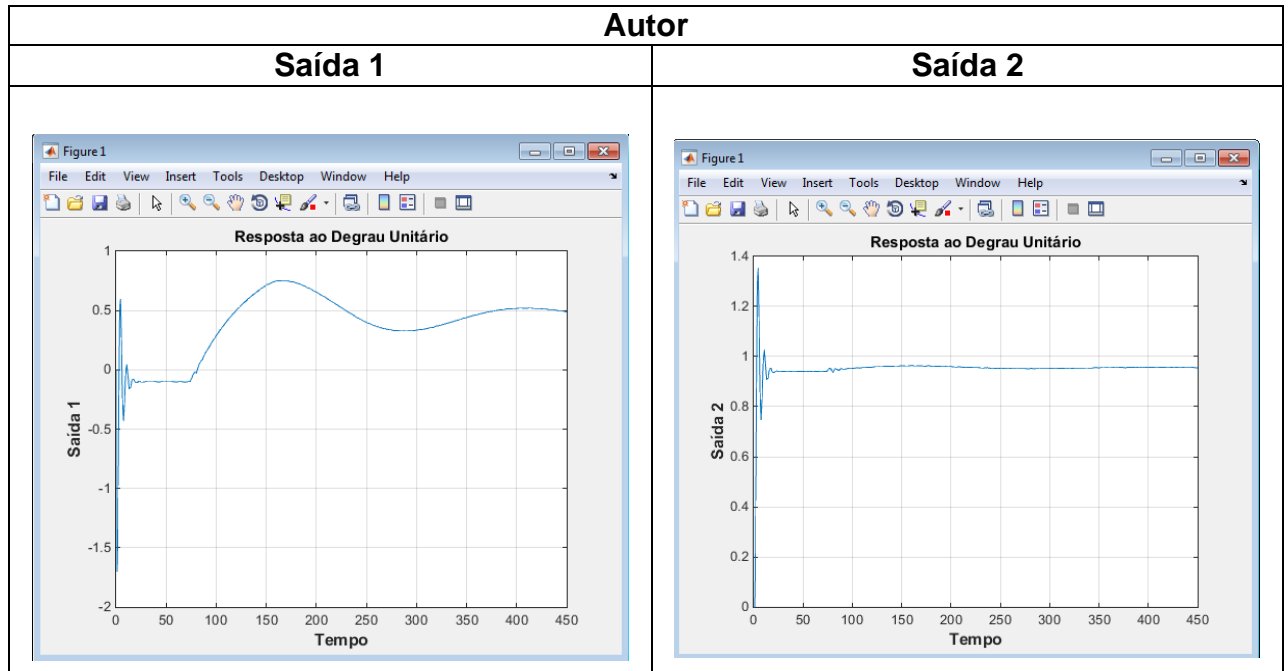


Figura 18 - Método de Isermann. Primeiro Processo, dados do Autor.  
Fonte: Autor.

O Quadro 9 representa os valores encontrados referente a primeira saída e o Quadro 10 os resultados obtidos da segunda saída.



Quadro 9 - Saídas, Ajuste Proporcional, dados do ALVES  
Fonte: Autor



Quadro 10 - Saídas, Ajuste Proporcional, dados do Autor  
Fonte: Autor.

Os ajustes aplicados apresentaram lentidão na saída 1, ela estabiliza com um valor inferior a 95% do valor de referência, o que resulta em erros de regime.

Para efeito de comparação, os itens que serão analisados serão: o Overshoot, ITAE, o tempo de subida ( $T_{subida}$ ) e o tempo de estabilização (Testabilização).

O tempo de subida é definido como o tempo levado para a saída atingir 10% a 90% do valor de referência.

O tempo de estabilização é o tempo gasto para saída conseguir estabilizar a um valor dentro de uma faixa de 95% a 105%. Esse valor varia de acordo com a literatura adotada, não existe um valor padrão para esse índice de desempenho.

O tempo de subida ou tempo de estabilização não determinado significa que dentro do intervalo de tempo de simulação utilizado não ocorrem às condições citadas acima para que se possam determinar tais tempos (Alves, 1988).

Efetua-se então uma comparação entre os itens destacados (ITAE,  $T_{subida}$ , Testabilização), apresentadas no Quadro 11, com os resultados das três implementações, sendo elas Alves Guedes XT 2002, o Alves Guedes Matlab e por fim o Autor, que são dados coletados pelo simulador criado (GUI) e aplicados conforme a metodologia.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 5379000                 | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 57755.5                 | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 54691.3                 | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 447000                  | 60.1                            | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 4354.77                 | 36.11                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 4514.93                 | 35.27                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

Quadro 11 - Resultados Ajuste Proporcional

Fonte: Autor

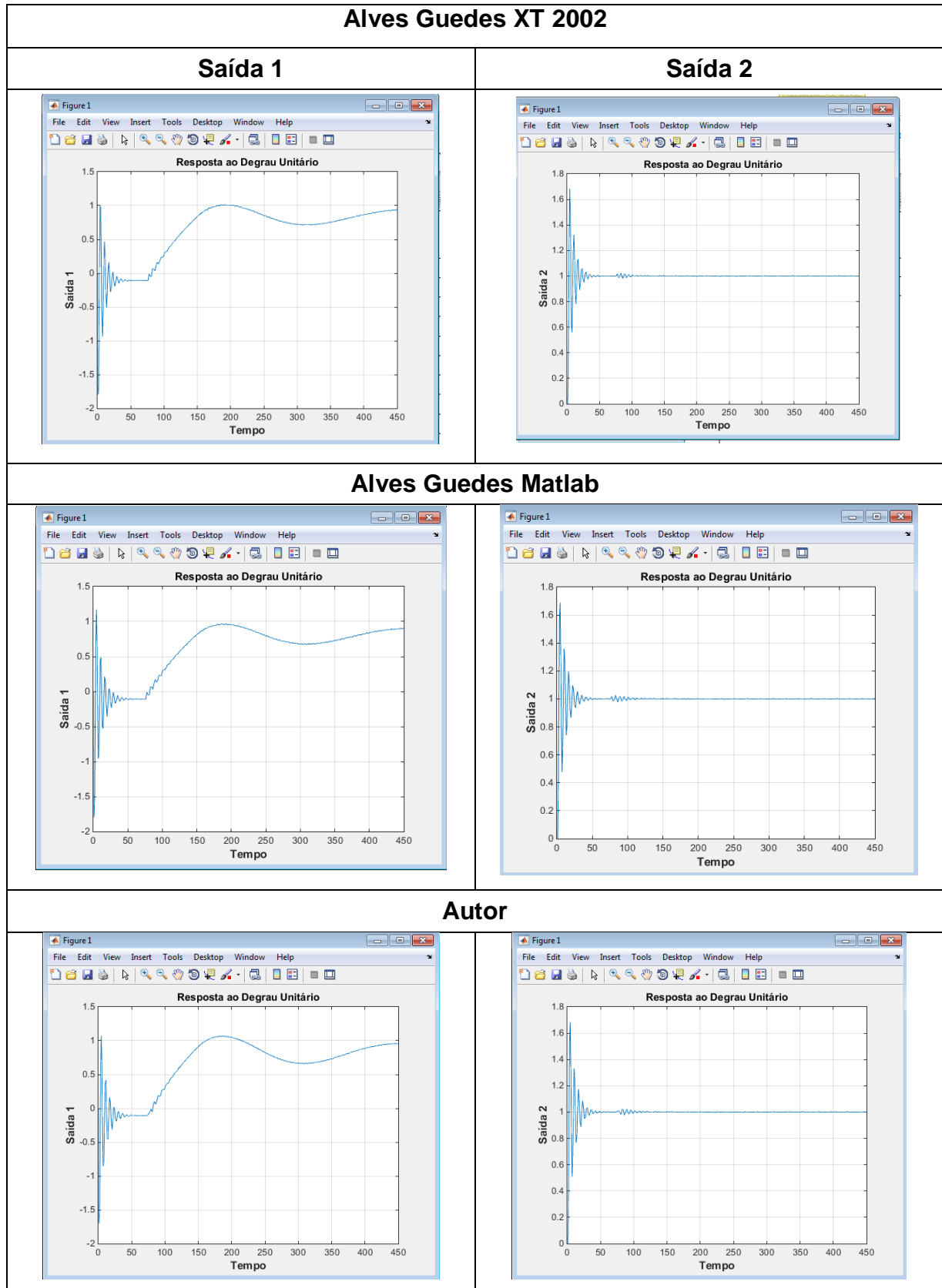
Inicia-se agora o ajuste no controlador PI, e de acordo com a metodologia descrita por Isermann obtém-se os resultados no Quadro 12:

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>T11</b> | <b>Kp2</b> | <b>T12</b> |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 0.06       | 169.03     | -1.8       | 3.83       |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0.06       | 194.65     | -1.8       | 3.44       |
| <b>Autor</b>                    | 0.066      | 187        | -1.7       | 3.55       |

Quadro 12 - Segundo Parâmetro

Fonte: Autor.

O autor Alves (1988), não conseguiu em seu simulador dar continuidade a partir desse ponto, pois segundo ele, a saída ficou instável. Consequência dos recursos limitados do simulador utilizado, entretanto, o Matlab foi capaz de realizar os cálculos sem que a saída fosse levada à instabilidade. Os resultados podem ser conferidos nos Quadros 13 e 14.



Quadro 13 - Saídas Ajuste PI  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 21618                   | 1.07                            | 0.9                        | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 25049.7                 | 16.86                           | 0.8                        | Não<br>Determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 22185.5                 | 6.85                            | 0.9                        | 430                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 208.54                  | 68.15                           | 1.2                        | 23.4                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 251.47                  | 68.77                           | 1.3                        | 29                                |
| <b>Autor</b>                        | 231.07                  | 68.37                           | 1.2                        | 24                                |

Quadro 14 - Resultados PI

Fonte: Autor

Pode-se fazer uma breve análise em relação ao controlador proporcional e o proporcional-integral, percebemos que conseguiu-se atingir o valor de referência e os valores dos erros foram significativamente diminuídos.

A etapa final fica por conta da escolha dos parâmetros para o controlador PID, conforme indica o Quadro 15 :

|                                     | Kp1    | Ti1    | TD1      | Kp2    | Ti2   | TD2     |
|-------------------------------------|--------|--------|----------|--------|-------|---------|
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>XT 2002</b> | 0.075  | 84.515 | 21.12875 | -2.25  | 1.915 | 0.47875 |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 0.075  | 97.325 | 24.33125 | -2.25  | 1.72  | 0.43    |
| <b>Autor</b>                        | 0.0825 | 93.5   | 23.375   | -2.125 | 1.775 | 0.44375 |

Quadro 15 - Terceiro Parâmetro

Fonte: Autor.

Esse ajuste não se mostrou eficiente, pois leva a saída à instabilidade. Em todas as situações não foram aceitos os parâmetros PID com a metodologia criada pelo Isermann.

#### 4.2.2. Segundo Processo

O próximo exemplo é um dos processos utilizados como base para fazer a validação do ajuste PID multivariável criado pelo Isermann.

|  |  |
|--|--|
| $\frac{1250}{s^4 + 30s^3 + 325s^2 + 1500s + 2500}$ | $\frac{-250}{s^3 + 20s^2 + 125s + 250}$          |
| $\frac{250}{s^3 + 20s^2 + 125s + 250}$             | $\frac{1200}{s^4 + 22s^3 + 165s^2 + 500s + 500}$ |

Quadro 16 - Segundo Processo

Fonte: Alves (1988).

O tempo de simulação adotado pelo Alves (1988) foi de 5 unidades de tempo.

Aplicando o cálculo de coeficiente de acoplamento estático demonstrado no capítulo 2, pode-se classificar esse processo como assimétrico e com acoplamento negativo.

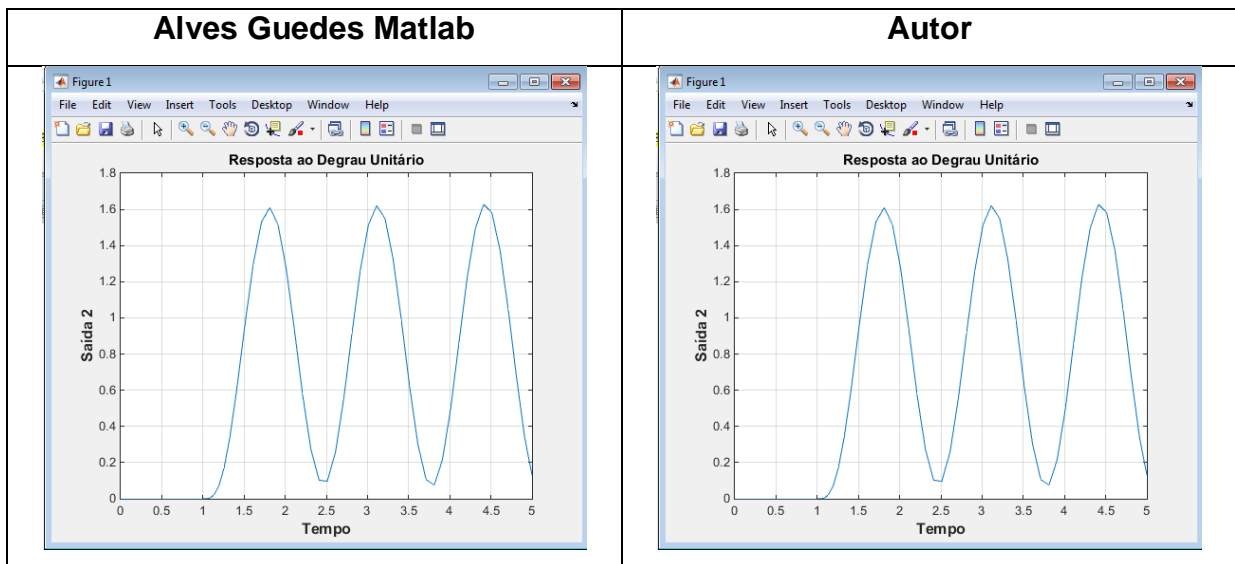
Fazendo o ajuste nos controladores proporcionais obtém-se os valores demonstrados no Quadro 17:

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc2</b> |
|-----------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 0          | 2.3        | 1.47         |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 0          | 2.3        | 1.3          |
| <b>Autor</b>                | 0          | 2.3        | 1.3          |

Quadro 17 - Primeiro Parâmetro

Fonte: Autor

O valor utilizado pelo Alves (1988) em seu simulador foi o mesmo para encontrar o valor crítico da saída 2 utilizando o Matlab. Isso resulta em valores de saída iguais e parâmetros analisados também, conforme o Quadro 18:



Quadro 18 - Resposta do Primeiro Parâmetro

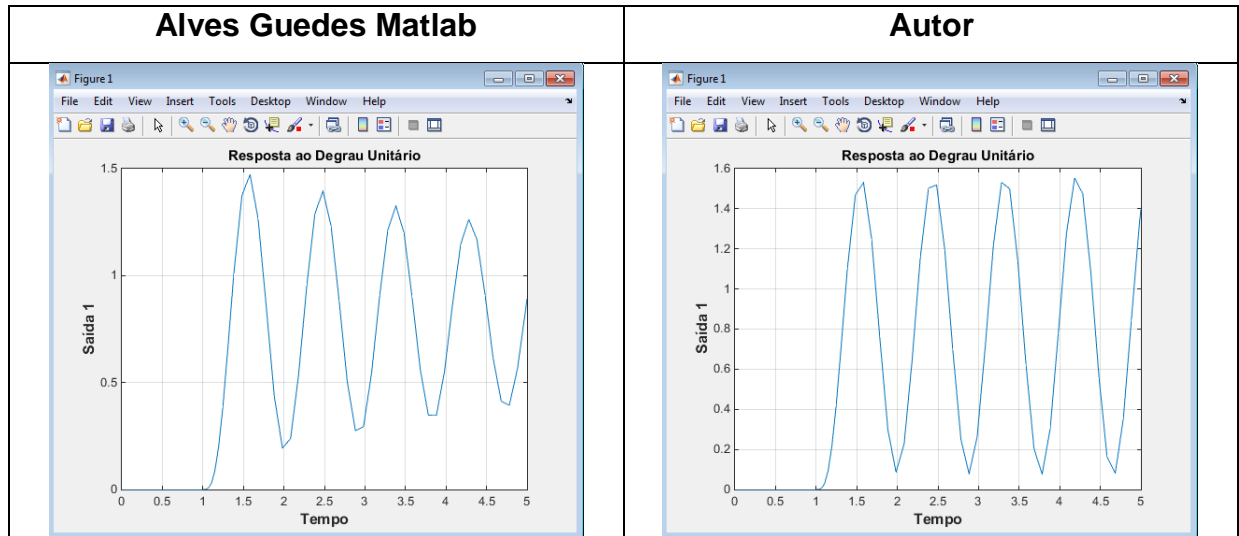
Fonte: Autor

Efetua o processo inverso para encontrar o valor máximo de Kp1, de acordo com o Quadro 19, e as saídas podem ser conferidas no Quadro 20.

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc1</b> |
|-----------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 8.3        | 0          | 1.02         |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 8.3        | 0          | 0.9          |
| <b>Autor</b>                | 9.05       | 0          | 0.9          |

Quadro 19 - Segundo Parâmetro

Fonte: Autor



Quadro 20 - Resposta do Segundo Parâmetro

Fonte: Autor

Pode-se observar no Quadro 20 que os valores estipulados por Alves (1988) estão um pouco defasados, visto que a saída está oscilando, mas não com a mesma amplitude como manda a metodologia. Esse exemplo demonstra de forma mais clara do que o seu antecessor (Quadro 5), como a saída deveria ficar pra encontrar o valor crítico dos ganhos  $Kp1$  e  $Kp2$ .

Aplicando o ajuste proporcional desenvolvido por Isermann, obtém-se os seguintes resultados que foram explicitados nos quadros 22 e 23.

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> |
|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 0.005      | 1.15       |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 0.005      | 1.15       |
| <b>Autor</b>                | 0.077      | 1.15       |

Quadro 21 - Ajuste Proporcional

Fonte: Autor

As regiões de estabilidade foram demonstrados pelas figuras 19 e 20, dados de Alves(1988) e Autor, respectivamente.

O Quadro 22 nos mostra o comportamento da saída 1, ela fornece valores muito abaixo do valor referência, valores negativos, isso significa que a ação de controle no sistema é fraca. Já a segunda saída, ela está estável.

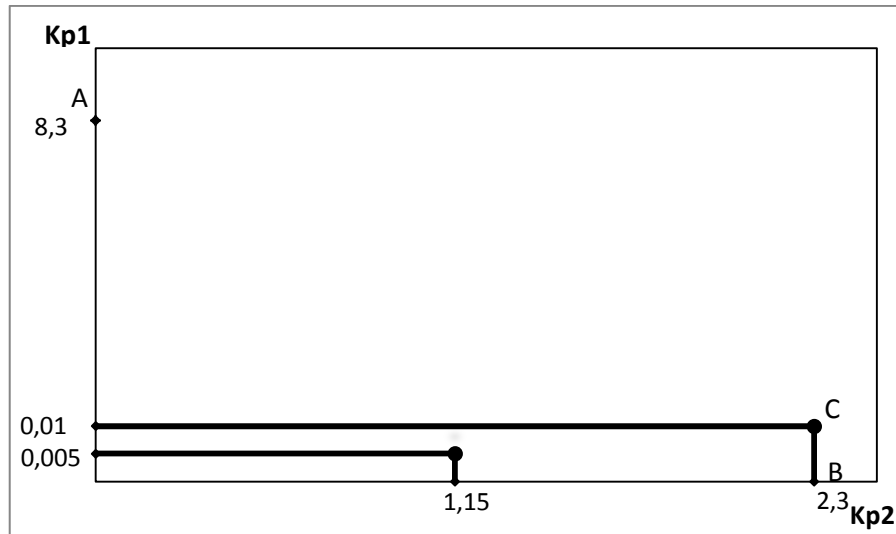


Figura 19 - Método de Isermann. Segundo Processo, dados do Alves  
Fonte: Autor.

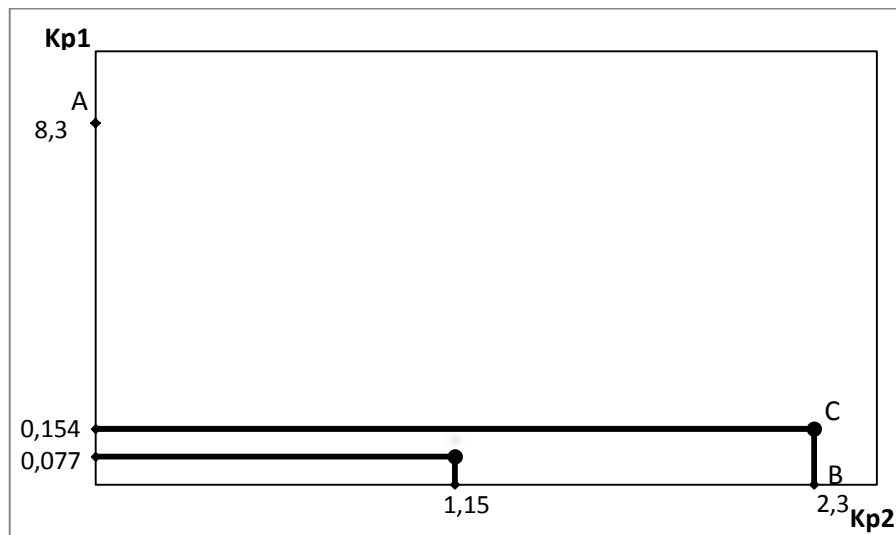
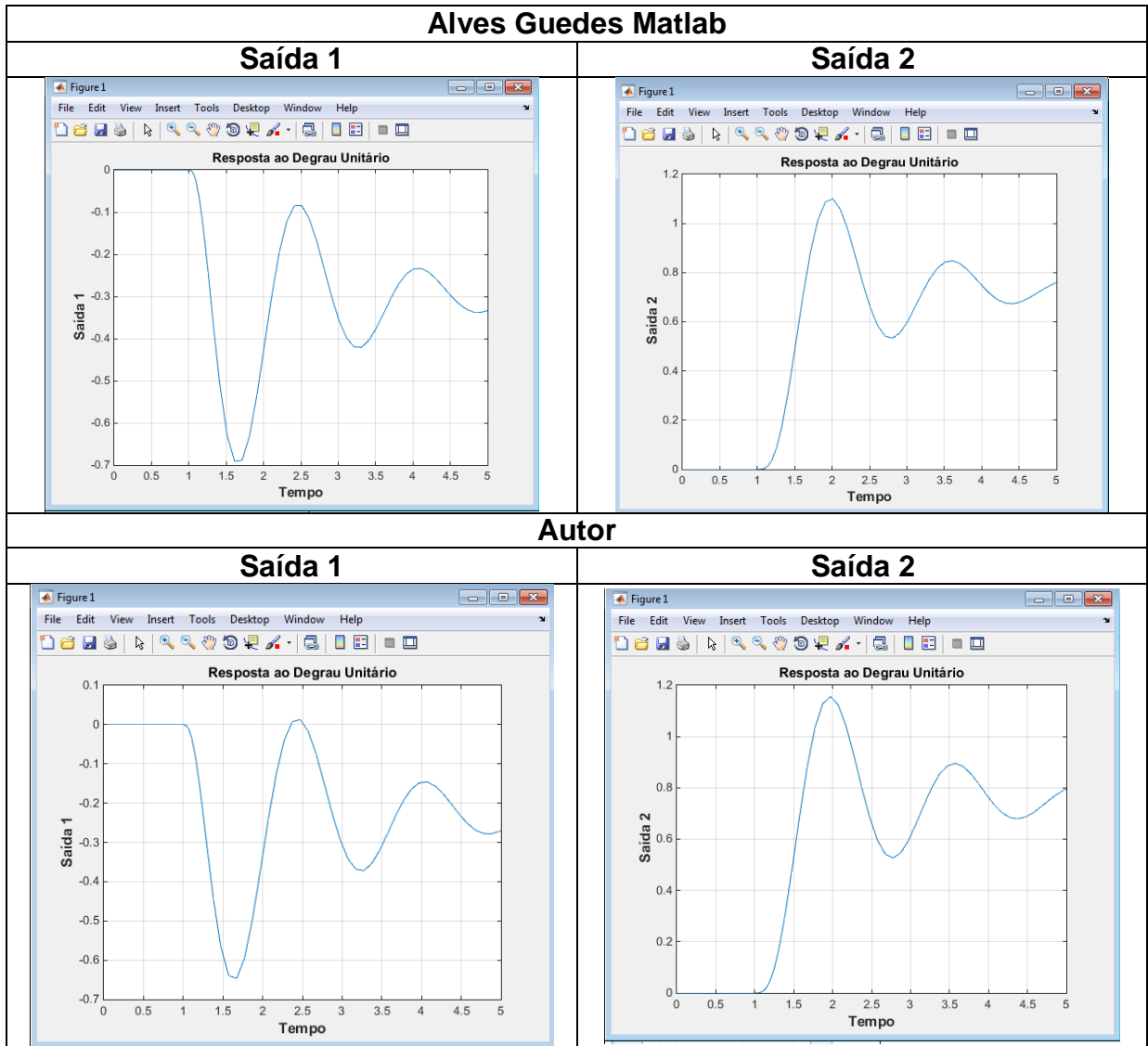


Figura 20 - Método de Isermann. Segundo Processo, dados do Autor  
Fonte: Autor.



Quadro 22 - Saídas Proporcional  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1631.74                 | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 15.73                   | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 14.92                   | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 334.28                  | 11.05                           | 0.45                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 3.5                     | 9.96                            | 0.45                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 3.3                     | 15.64                           | 0.5                        | Não<br>determinado                |

Quadro 23 - Resultados Proporcional

Fonte: Autor

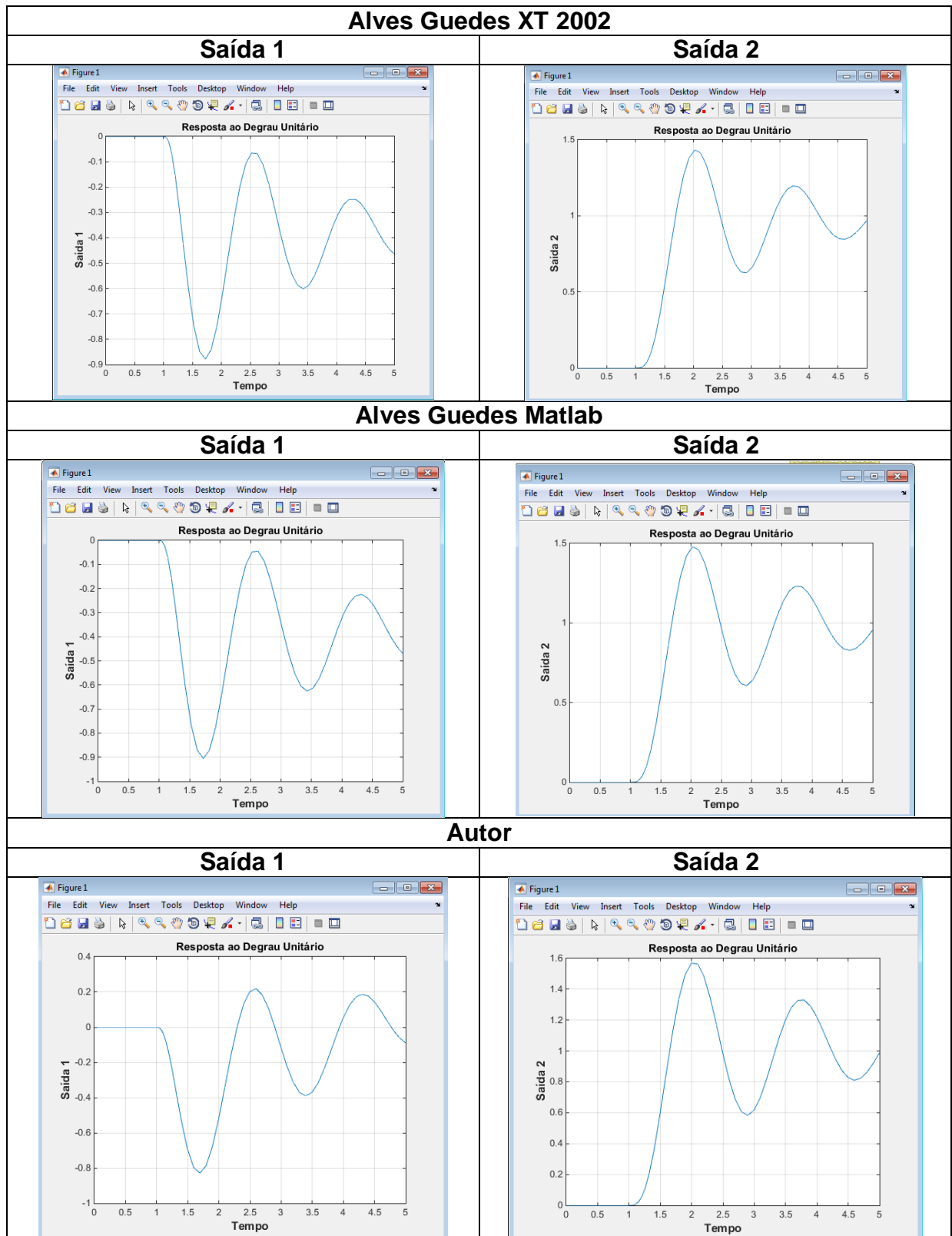
Realiza-se agora o ajuste no controlador PI, conforme o Quadro 24:

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Ti1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Ti2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 0.005      | 0.87       | 1.15       | 1.26       |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0.005      | 0.765      | 1.15       | 1.105      |
| <b>Autor</b>                    | 0.077      | 0.765      | 1.15       | 1.105      |

Quadro 24 - Parâmetros PI

Fonte: Autor

São demonstrados os resultados visuais no Quadro 25 e os índices das saídas no Quadro 26:



Quadro 25 - Saída Ajuste PI

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1739.25                 | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 16.67                   | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 13.25                   | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1675.52                 | 44.70                           | 0.38                       | 4.76                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 2.65                    | 47.82                           | 0.38                       | 4.9                               |
| <b>Autor</b>                        | 3.00                    | 56.98                           | 0.37                       | 4.9                               |

Quadro 26 - Resultados PI

Fonte: Autor

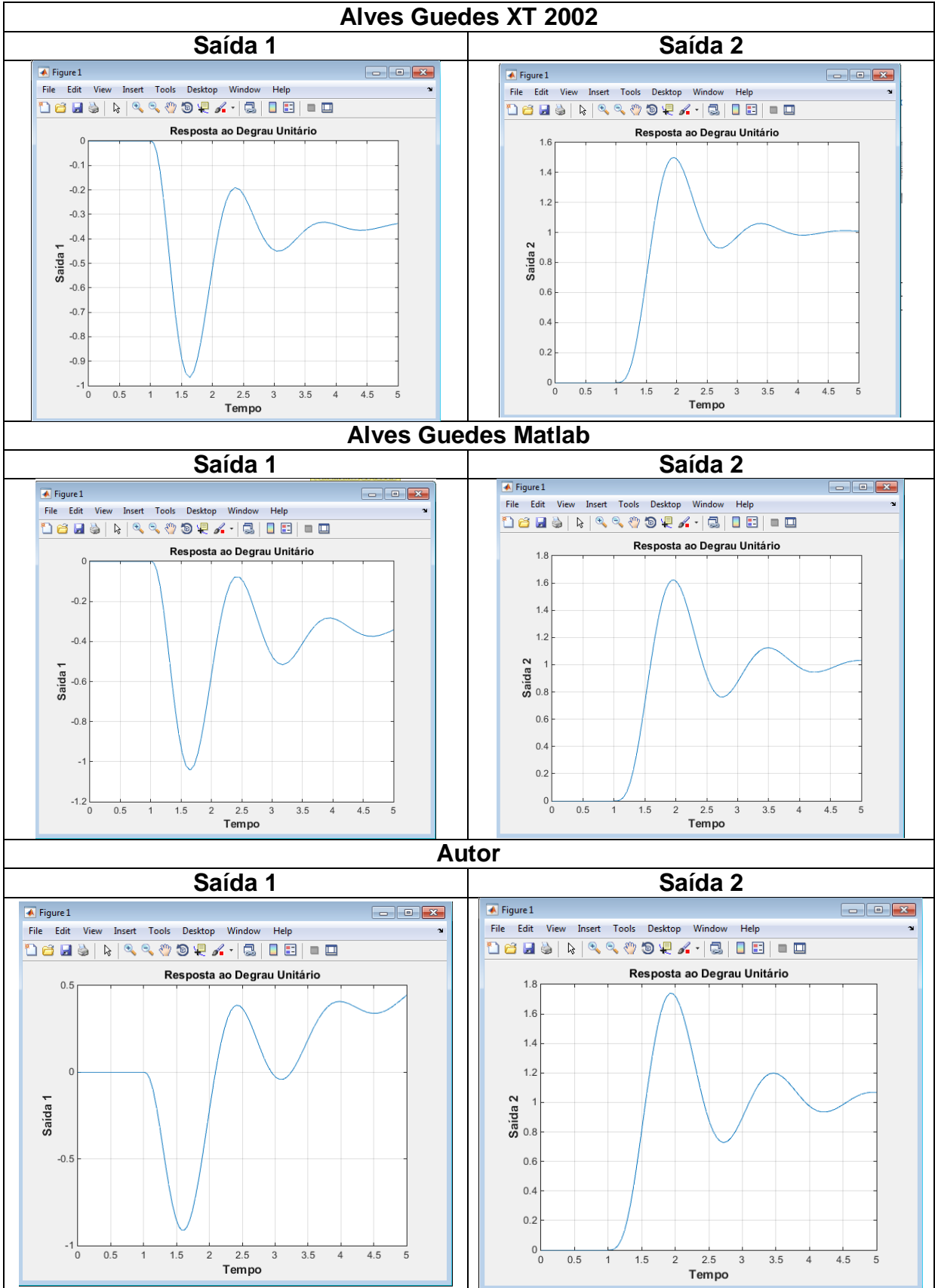
Finalizando o procedimento, o Quadro 27 informa sobre o último ajuste do PID:

|                                     | <b>Kp1</b> | <b>Ti1</b> | <b>TD1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Ti2</b> | <b>TD2</b> |
|-------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>XT 2002</b> | 0.00625    | 0.435      | 0.11       | 1.44       | 0.63       | 0.16       |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 0.00625    | 0.3825     | 0.095625   | 1.4375     | 0.5525     | 0.138125   |
| <b>Autor</b>                        | 0.09625    | 0.3825     | 0.095625   | 1.4375     | 0.5525     | 0.138125   |

Quadro 27 - Parâmetros PID

Fonte: Autor.

Os resultados desse ajuste podem ser conferidos nos Quadros 28 e 29.



Quadro 28 - Saídas PID

Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1700.8                  | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 16.62                   | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 10                      | Não há                          | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 44.94                   | 41.69                           | 0.30                       | 2.43                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.81                    | 62.02                           | 0.32                       | 3.8                               |
| <b>Autor</b>                        | 2.15                    | 73.98                           | 0.30                       | 3.8                               |

Quadro 29 - Resultado PID

Fonte: Autor.

Fazendo uma análise pode-se perceber que os parâmetros utilizados pelo autor deste trabalho, foi possível corrigir um pouco o problema da saída 1 que ficaram com valores negativos. Já os parâmetros desenvolvidos pelo Alves (1988) não obteve êxito nesse aspecto, pois sua saída ficou completamente negativa. Outro ponto positivo foi que teve uma melhora pequena, mas considerável tanto no tempo de estabilização quanto no tempo de subida.

#### 4.2.3. Terceiro Processo

O terceiro processo, exposto no Quadro 30, segundo Alves (1988) é um processo aparentemente simples, no entanto oferece dificuldades para efetuar o controle.

|  |  |
|--|--|
| $\frac{0.0476}{s^2 + 0.476s + 0.0476}$ | $\frac{0.0286}{s^2 + 0.343s + 0.0286}$ |
| $\frac{0.0833}{s^2 + 0.583s + 0.0833}$ | $\frac{0.0833}{s^2 + 0.667s + 0.0833}$ |

Quadro 30 - Terceiro Processo

Fonte: Alves (1988).

O tempo de simulação nesse processo foi de 36 unidades de tempo.

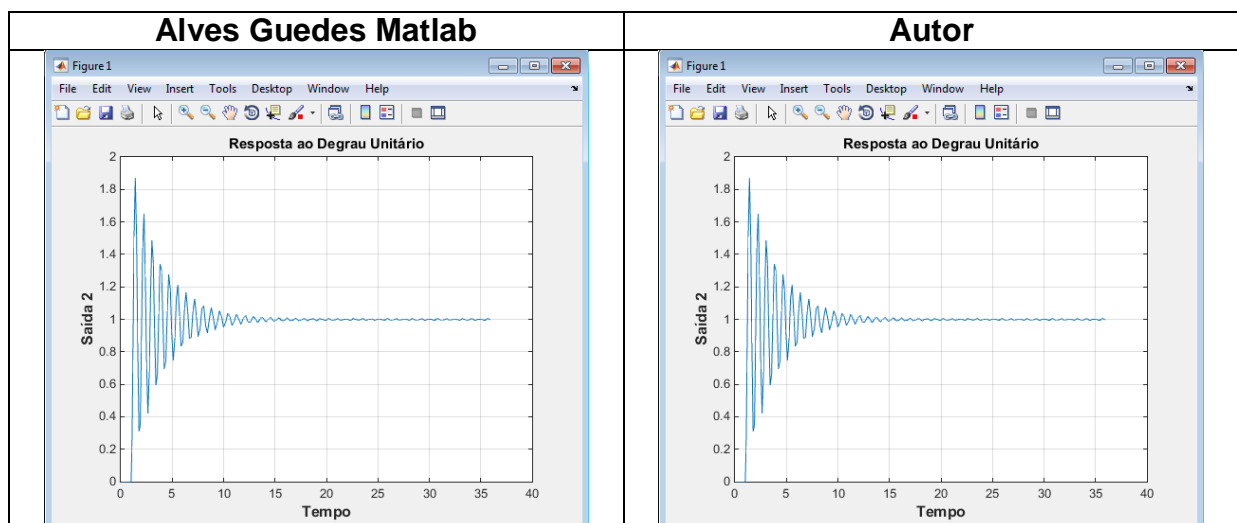
Quanto à classificação da planta pode-se dizer que é um processo assimétrico com acoplamento positivo de acordo com o cálculo de coeficiente de acoplamento estático.

Aplicando o método de Isermann foi obtido os valores do Quadro 31 e 32 referente a primeira saída.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 0          | 700        | 0.84         |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0          | 700        | 0.84         |
| <b>Autor</b>                    | 0          | 700        | 0.84         |

Quadro 31 - Primeiro Parâmetro

Fonte: Autor.



Quadro 32 - Saída Primeiro Processo

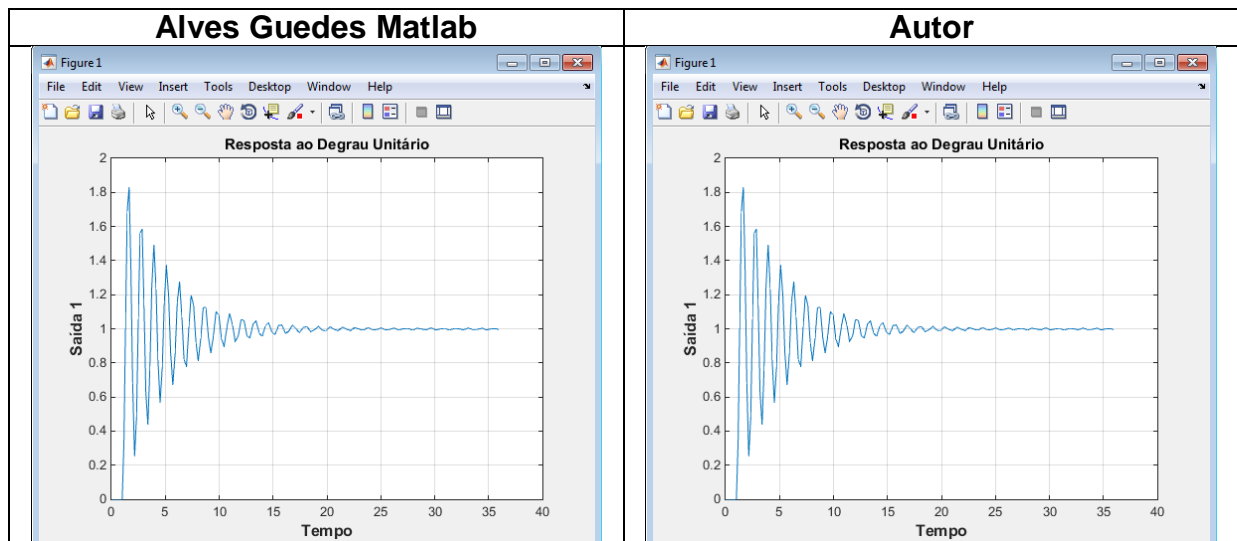
Fonte: Autor.

Os dados encontrados da segunda saída pode ser visto no Quadro 33 e 34.

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc1</b> |
|-----------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 600        | 0          | 1.16         |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 600        | 0          | 1.21         |
| <b>Autor</b>                | 600        | 0          | 1.21         |

Quadro 33 - Segundo Parâmetro

Fonte: Autor.



Quadro 34 - Saída Segundo Parâmetro

Fonte: Autor.

Pode-se notar que o comportamento dessa planta é a sua oscilação, ela consegue suportar valores elevados sem que leve o sistema para a instabilidade, o problema é que se nós aumentarmos muito o valor do ganho tentando atingir sua instabilidade torna-se o sistema passível de muitos erros e para uma futura correção teria que ser aplicado inúmeros ajustes finos.

O Quadro 35 demonstra os valores do ganho proporcional desse processo, onde é formado na Figura 21 a região de estabilidade e os resultados nos Quadros 36 e 37.

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> |
|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 300        | 300        |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | 300        | 300        |
| <b>Autor</b>                | 300        | 300        |

Quadro 35 - Ajuste Proporcional

Fonte: Autor.

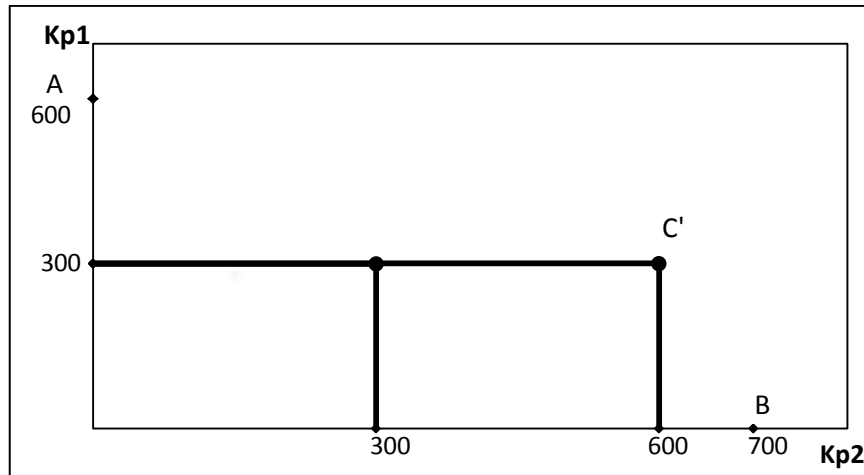
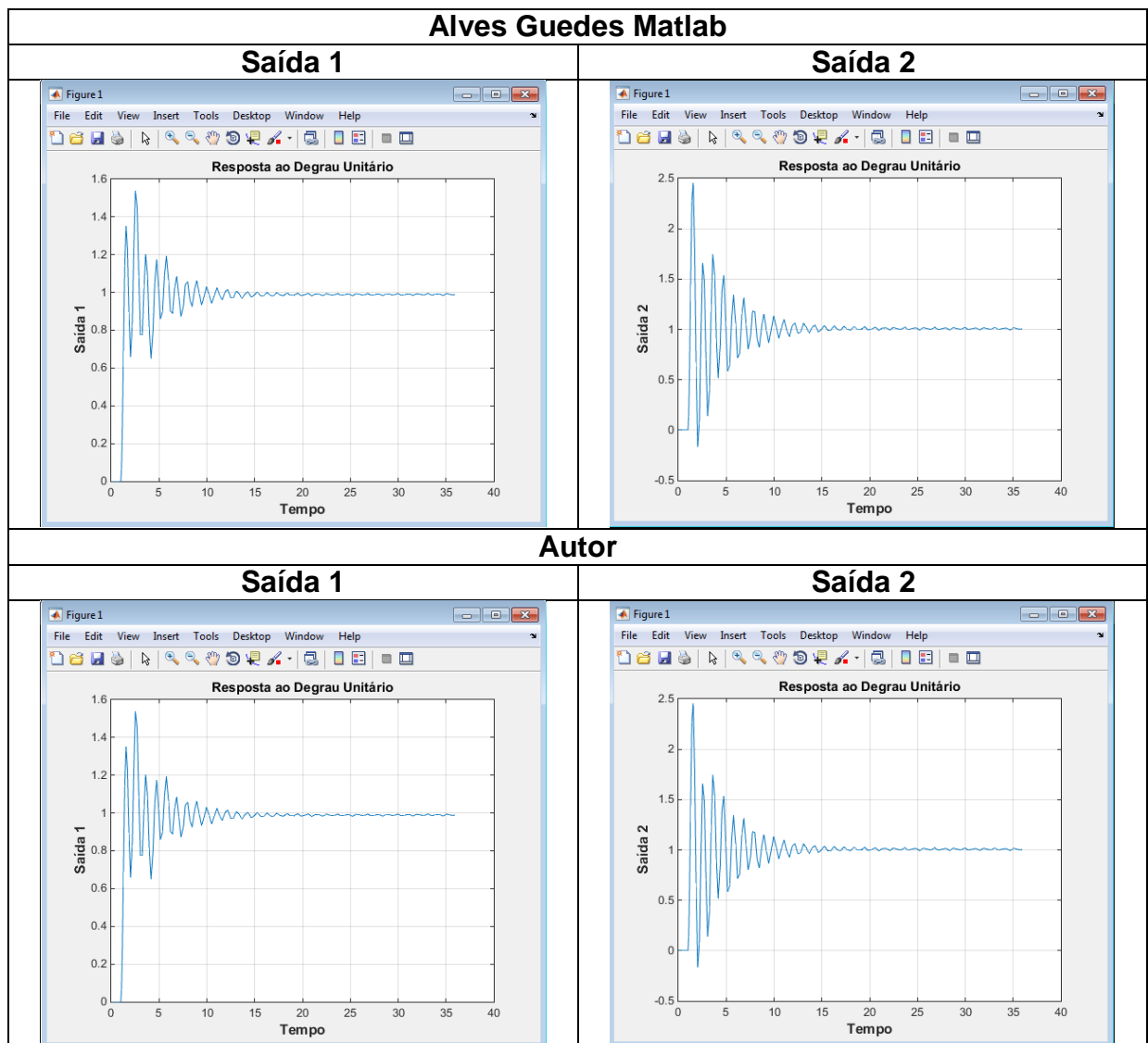


Figura 21 - Método de Isermann. Terceiro Processo, Alves e Autor  
Fonte: Autor.



Quadro 36 - Resultados Ajuste Proporcional  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 3189.01                 | 40.88                           | 0.24                       | 25.56                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 11.94                   | 53.63                           | 0.24                       | 9.5                               |
| <b>Autor</b>                        | 11.94                   | 53.63                           | 0.24                       | 9.5                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 7618.28                 | 160.73                          | 0.14                       | 33.48                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 19.81                   | 145.83                          | 0.15                       | 13.17                             |
| <b>Autor</b>                        | 19.81                   | 145.83                          | 0.15                       | 13.17                             |

Quadro 37 - Resultados Proporcional

Fonte: Autor.

Fazendo agora o ajuste PI, conforme os resultados no Quadro 38:

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Ti1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Ti2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 300        | 0.99       | 300        | 0.71       |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 300        | 1.03       | 300        | 0.71       |
| <b>Autor</b>                    | 300        | 1.03       | 300        | 0.71       |

Quadro 38 - Ajuste PI

Fonte: Autor.

Esse ajuste levou o sistema à instabilidade. Tanto o simulador criado pelo Alves (1988) e o uso do Matlab utilizado pelo autor não foram capazes de dar sequência no ajuste do PID para esse sistema.

Pela segunda vez ocorreu uma instabilidade no ajuste do controle PID em sistemas TITO, isso demonstra que fazer o controle de sistemas de duas entradas e duas saídas não é algo simples de se executar.

#### 4.2.4. Quarto Processo

O quarto e último processo possui uma planta com um grau bastante elevado e também apresenta dificuldade na execução de ajuste em seu controle.

|  |  |
|--|--|
| $\frac{-(1 + 13.81s)^2(1 + 18.4s)}{(1 + 59s)^5}$ | $\frac{1.771}{(1 + 153.5s)(1 + 24s)(1 + 15s)}$ |
| $\frac{0.0605}{695s}$                            | $\frac{0.96}{695s(1 + 15s)}$                   |

Quadro 39 - Quarto Processo

Fonte: Alves (1988).

O tempo de simulação utilizado nessa planta foi de 900 unidades de tempo.

Em relação quanto sua classificação ficou denominado processo assimétrico e com acoplamento negativo motivado pelo cálculo do coeficiente de acoplamento estático e seu ganho estático.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 0          | 1450       | 17           |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | 0          | 1450       | 17.68        |
| <b>Autor</b>                    | 0          | 1450       | 17.68        |

Quadro 40 - Primeiro Parâmetro

Fonte: Autor.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tosc1</b> |
|---------------------------------|------------|------------|--------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | -5         | 0          | 416          |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | -5         | 0          | 360          |
| <b>Autor</b>                    | -5         | 0          | 360          |

Quadro 41 - Segundo Parâmetro

Fonte: Autor.

|                             | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> |
|-----------------------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | -2.5       | 2.5        |
| <b>Alves Guedes Matlab</b>  | -2.5       | 2.5        |
| <b>Autor</b>                | -2.5       | 2.5        |

Quadro 42 - Ajuste Proporcional

Fonte: Autor.

Como os parâmetros encontrados pelo autor e pelo Alves (1988) foram iguais, conseqüentemente suas saídas também serão conforme mostra o Quadro 36.

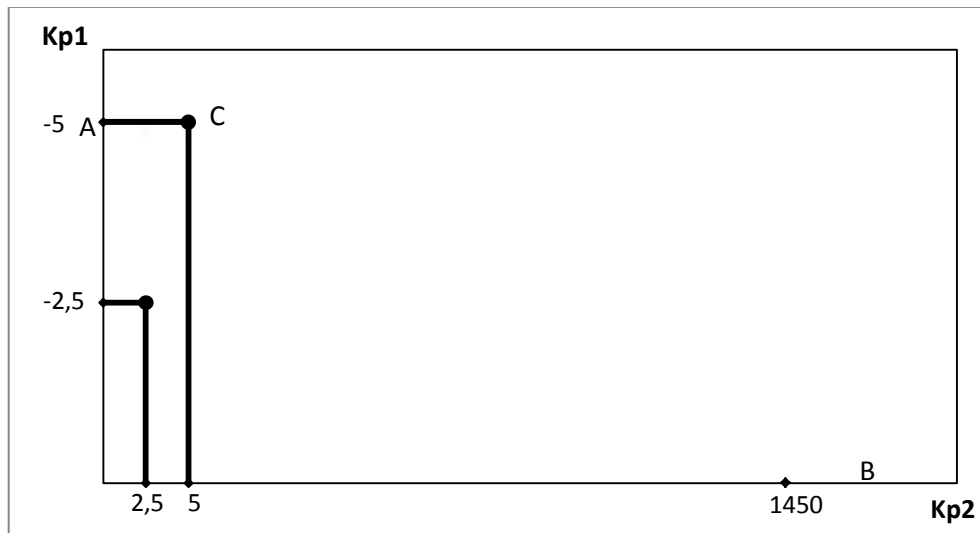
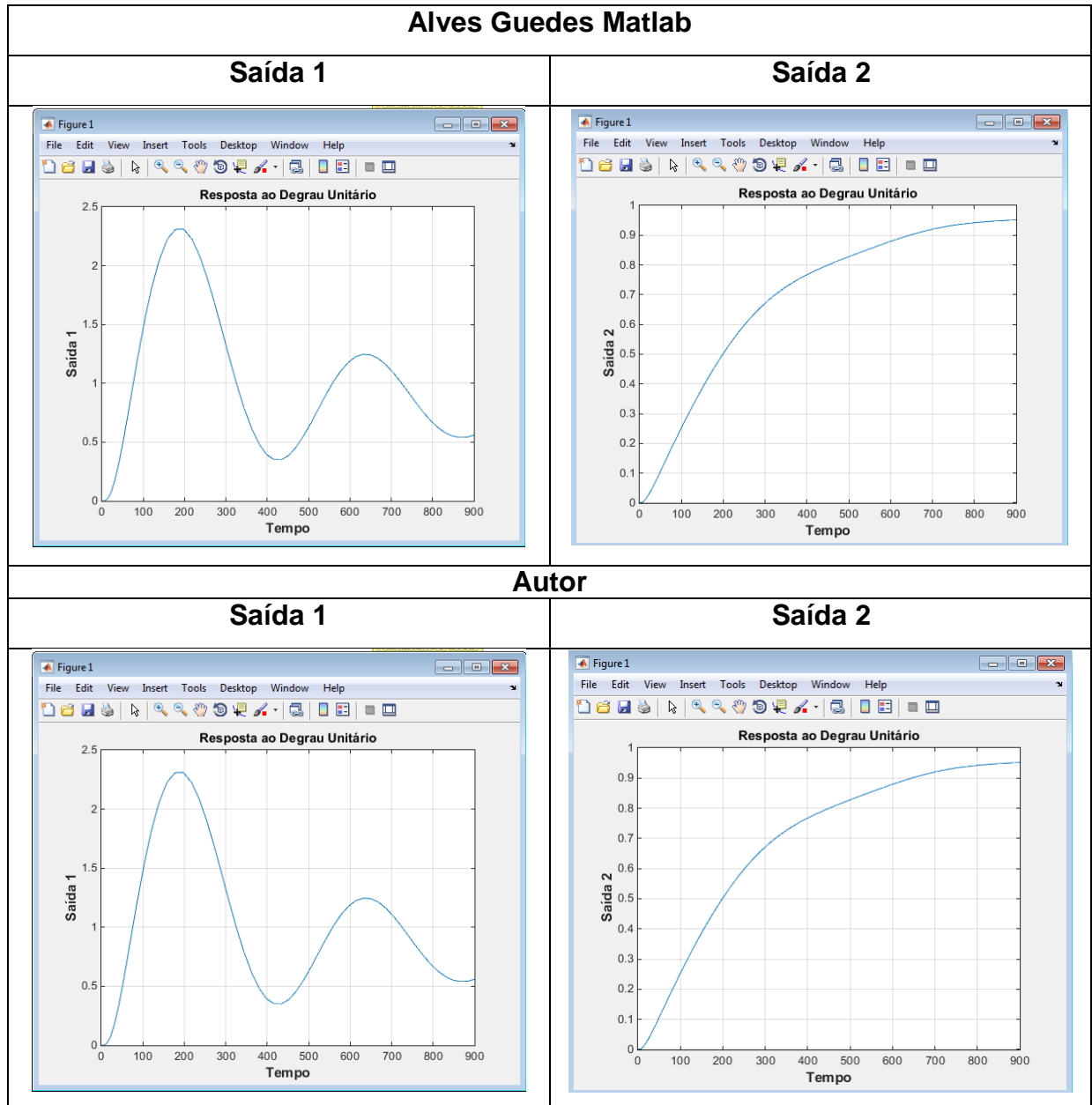


Figura 22 - Método de Isermann. Quarto Processo, Alves e Autor..

Fonte: Autor.



Quadro 43 - Saída Proporcional  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 14166000                | 132.48                          | 46                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 146447                  | 131.14                          | 47                         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 146447                  | 131.14                          | 47                         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot(%)<br/>Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 6524000                 | Não há                          | Não<br>determinado         | 873                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 65620                   | Não há                          | 597                        | 880                               |
| <b>Autor</b>                        | 65620                   | Não há                          | 597                        | 880                               |

Quadro 44 - Resultado Proporcional

Fonte: Autor.

Prosseguindo, fazendo o ajuste no controlador tipo PI:

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Tl1</b> | <b>Kp2</b> | <b>Tl2</b> |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | -2.5       | 353.6      | 2.5        | 14.4       |
| <b>Alves Guedes<br/>Matlab</b>  | -2.5       | 306        | 2.5        | 15.028     |
| <b>Autor</b>                    | -2.5       | 306        | 2.5        | 15.028     |

Quadro 45 - Ajuste PI

Fonte: Autor.

Mais uma vez, a entrada desses valores levou ambas saídas à instabilidade, o que encerra a aplicação do método desenvolvido pelo Isermann.

Isso demonstra que obter o controle de em sistemas com duas entradas e duas saídas não é algo trivial e por várias vezes utilizar apenas métodos que garantem o ajuste grosso não é o suficiente para que se obtenha êxito no controle do processo.

Esse trabalho atinge esse ponto onde dá ao usuário uma opção de ajuste com mais detalhes em sistemas TITO.

## 5. Controle de Sistemas TITO Utilizando Ajuste Grosso e Ajuste Fino

Chegamos à etapa final, que consiste na aplicação da metodologia criada por Alves (1988) para fazer o ajuste em uma camada mais detalhada para sistemas com duas entradas e duas saídas utilizando o controlador PID.

O percurso adotado se dá pela mesma forma do anterior, só que agora iremos executar um ajuste fino após cada ajuste grosso, tentando obter um ajuste mais satisfatório do sistema TITO.

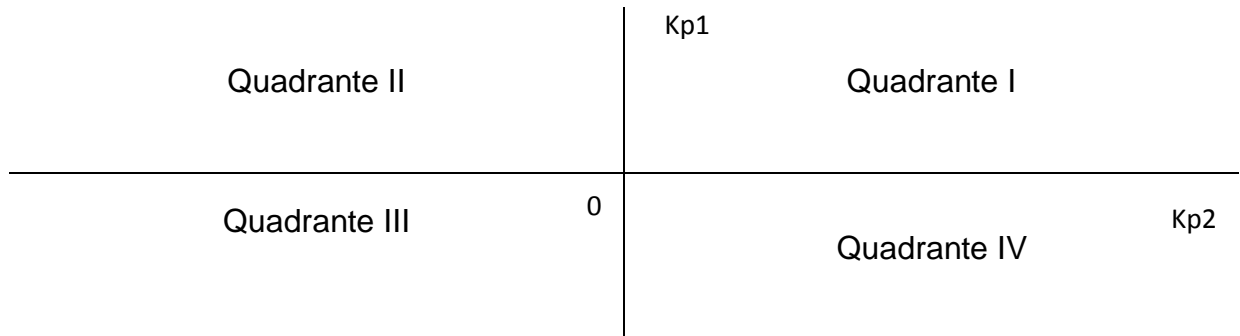
O valor quantitativo dos ajustes grossos usados também sofreram mudanças, resultados de métodos diversificados que o Alves (1988) utilizou para desenvolver sua metodologia.

### 5.1. AJUSTE GROSSO

Foi desenvolvido o ajuste grosso através de outros três métodos de ajustes em controladores PID que são:

- O método da sensibilidade descrita pelos autores Ziegler e Nichols (1942) comentado no capítulo 2, para sistemas monovariáveis.
- Também descrito no capítulo 2, o método de Isermann (1981) para sistemas com duas entradas e duas saídas.
- E por fim, o método de Niederlinski (1971) que realiza o controle em sistemas que possuem várias entradas e saídas.

Segundo Alves (1988) as regiões de estabilidade do sistema poderão estar situadas em um dos quatro quadrantes do plano cartesiano formado pelos eixos  $Kp1$  e  $Kp2$ , conforme mostra o quadro 46, dependendo exclusivamente dos ganhos estáticos das funções de transferência diretas, ou seja,  $G11$  e  $G22$ .



Quadro 46 - Determinação do Quadrante No Qual se Situa a Região de Estabilidade do Sistema que se Deseja Controlar

Fonte: Alves (1988), adaptada pelo Autor.

Onde nós temos que:

Quadrante I –  $Kp1 > 0$  e  $Kp2 > 0$

Quadrante II –  $Kp1 > 0$  e  $Kp2 < 0$

Quadrante III –  $Kp1 < 0$  e  $Kp2 < 0$

Quadrante IV –  $Kp1 < 0$  e  $Kp2 > 0$

Primeiramente, deve-se efetuar a determinação dos pontos A, B, C e D, conforme ilustra a figura 23:

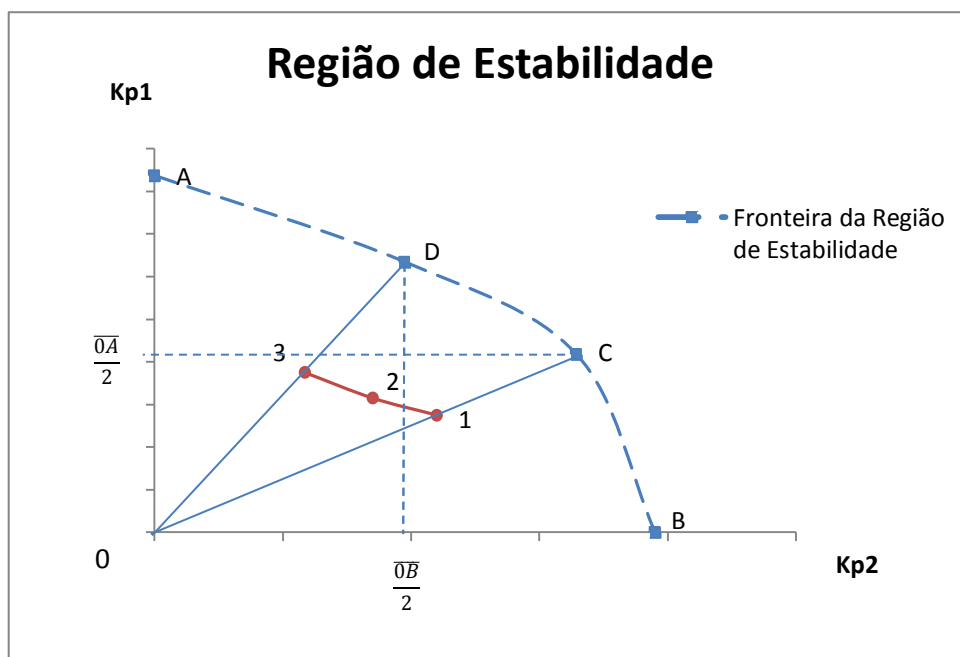


Figura 23 - Metodologia Desenvolvida por Péricles Guedes Alves

Fonte: Alves (1988), adaptada pelo Autor.

Alguns parâmetros devem ser adotados, para dar continuidade ao método, é o caso dos períodos de oscilação e os pontos que são determinados pela figura 23. Para a saída 1 foi denominado de  $Tosc1$  e com o ponto referente a letra “A”, para a saída 2 ficou denominado de  $Tosc2$  e o ponto referente a letra “B”. Ambos fazem alusão aos pontos da extremidade, isto é, o seu limite de estabilidade.

### 5.1.1. AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PROPORCIONAL

Para efetuar o ajuste grosso no controlador proporcional, deve-se traçar as retas  $\overline{OD}$  e  $\overline{OC}$  para determinar os pontos 1, 2 e 3, sendo que, o ponto 2 é a média dos pontos 1 e 3.

Para determinármos o valor do ponto 1, fazemos:

$$K_{pi} = 0.6 K_{pimáx}, i = 1 e 2 \quad (5.1)$$

Onde  $K_{pi}$  são coordenadas do ponto 1 e  $K_{pimáx}$  são referentes ao ponto C.

Para determinármos o valor do ponto 3, fazemos:

$$K_{pi} = 0.6 K_{pimáx}, i = 1 e 2 \quad (5.2)$$

Onde  $K_{pi}$  são coordenadas do ponto 3 e  $K_{pimáx}$  são referentes ao ponto D.

Por fim, após a encontrar os três pontos o usuário deve escolher destes pontos para dar sequência ao ajuste. Para podermos escolher um ponto que seja quantitativamente melhor ou que possua menos erros, Alves (1988) sugere o uso o ITAE ponderado, que têm como base a determinação dos valores de índices das saídas 1 e 2.

$$ITAE \text{ ponderado} = \frac{peso1 ITAE1 + peso2 ITAE2}{peso1 + peso2} \quad (5.3)$$

Onde o parâmetro ITAE1 faz alusão ao valor do ITAE referente à saída 1 e que o ITAE2 é referente ao valor de ITAE da saída 2. Além disso, ambos pesos têm valor unitário.

Segundo o Alves (1988) o ponto escolhido para ajuste pode apresentar ainda alguns problemas, tais como lentidão na resposta ou resposta com oscilações indesejáveis.

Para caso de oscilação, o usuário deve levar o ponto mais próximo da origem. Em caso de lentidão na resposta, o usuário deve aproximar o ponto da extremidade. Para fazer essas mudanças descritas acima, visando melhorar o ajuste, deve-se após cada ajuste grosso realizar o ajuste fino que será descrito mais à frente.

O valor de 0.6 utilizado no método de Alves (1988) para o ajuste grosso do controlador proporcional se deu pela junção do método de Isermann (1981) e o método de Niederlinski (1971) onde temos um usando o valor de 0.5 e o outro 0.7, por isso o autor utilizou o valor intermediário.

### 5.1.2. AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PI

A ação integradora é um dos fatores que reduzem a região de estabilidade, portanto uma alteração se torna necessária no ganho tipo P, o qual já se encontra ajustado. O modelo adotado pelo autor Alves (1988) foi:

$$K_{pi}(PI) = 0.9 K_{pi}(Proporcional), \quad i = 1 e 2 \quad (5.4)$$

$$T_{Ii}(PI) = 0.85 T^*, \quad i = 1 e 2 \quad (5.5)$$

Sendo  $T^*$  referente à :

$T_{osc1}$  para o controlador 1 e  $T_{osc2}$  para o controlador 2.

Se após esse ajuste o usuário não estiver satisfeito deve-se então adotar o ajuste fino.

### 5.1.3. AJUSTE GROSSO CONTROLADOR PID

A ação derivativa faz o oposto da integradora, ela aumenta a região de estabilidade, mas um valor muito elevado pode levar o sistema à instabilidade, por isso, deve-se adotar valores pequenos em TD. O autor Alves (1988) adotou o parâmetro utilizado pelo Niederlinski (1971) para o ajuste do controlador PID, por ser segundo ele mais seguro, que é:

$$K_{pi}(PID) = 1.2 K_{pi}(PI) \quad (5.6)$$

$$T_{Ii}(PID) = 0.6 T_{Ii}(PI) \quad (5.7)$$

$$T_{Di}(PID) = 0.25 T_{Di}(PI) \quad (5.8)$$

Novamente, se após o ajuste haja necessidade de corrigir alguns parâmetros, deve-se fazer o uso do ajuste fino.

## 5.2. AJUSTE FINO

Após a determinação dos ajustes grossos em todos os três controladores, partiremos agora para o ajuste fino, que é o ajuste mais detalhado e é feito após cada ajuste grosso. Nesse ajuste, o usuário têm uma autonomia maior pois é nele que é efetuado as correções de acordo com as suas percepções ou necessidade de controle de um processo.

Esse ajuste, segundo o autor Alves (1988), tem como princípio fundamental, a tentativa de se encontrar novos pontos de ajuste dentro da região de estabilidade diferentes do ponto determinado pelo ajuste grosso.

Para análise de cada saída, demonstrado no Quadro 47 e na Figura 24, espera-se três situações distintas que são: saída oscilatória, saída lenta (alto tempo de estabilização) e saída dentro do que o usuário espera.

|                          |    |
|--------------------------|----|
| <b>SAÍDA OSCILATÓRIA</b> | 1  |
| <b>SAÍDA LENTA</b>       | 0  |
| <b>SAÍDA BOA</b>         | OK |

| <b>SAÍDA 1</b> | <b>SAÍDA 2</b> | <b>SENTIDO DE PERCURSO</b> |
|----------------|----------------|----------------------------|
| 1              | 1              | 1                          |
| 1              | OK             | 2                          |
| OK             | 1              | 3                          |
| 1              | 0              | 4                          |
| 0              | 1              | 5                          |
| OK             | OK             | 6                          |
| OK             | 0              | 7                          |
| 0              | OK             | 8                          |
| 0              | 0              | 9                          |

Quadro 47 - Quadro para Utilização do Ajuste Fino

Fonte: Alves (1988) adaptada pelo autor

O quadro 47 é bem intuitivo de entender. Ele é composto por três colunas, sendo que duas delas são referente às saídas 1 e 2. São as duas saídas que nos dirão como nós deve-se aplicar o ajuste fino do processo. Vamos observar a imagem a seguir:

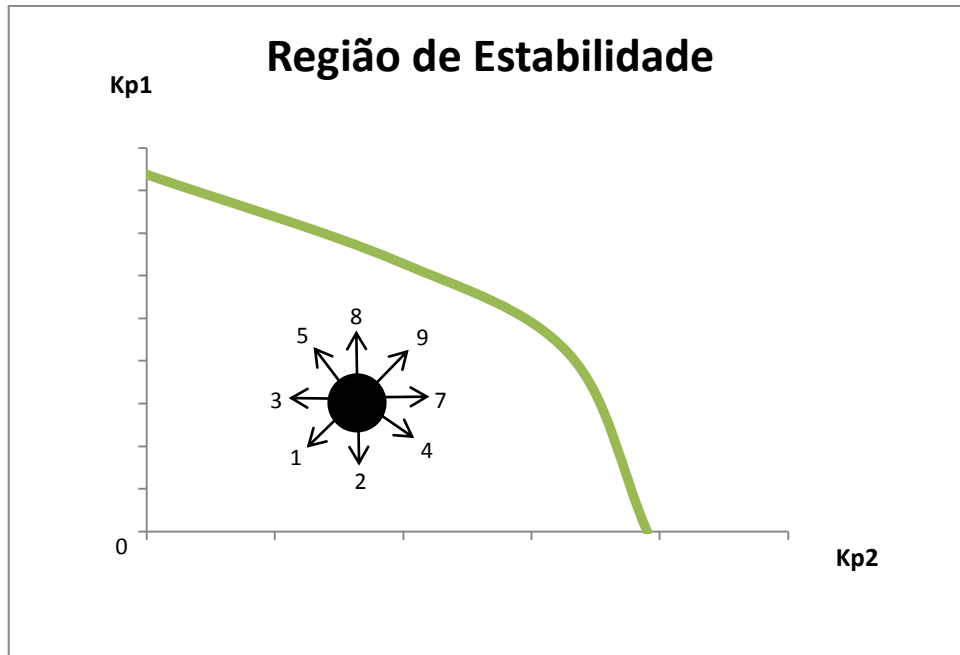


Figura 24 - Sentidos de Percurso Dentro da Região de Estabilidade  
 Fonte: Alves, Guedes (1988), adaptada pelo Autor.

Para exemplificar, considere os seguintes casos:

- Considere que a saída 1 esteja oscilatória e a saída 2 também. Segundo o quadro 47 a saída oscilatória corresponde ao número "1", isso quer dizer que o sentido de percurso que deve-se adotar é o "1". Isso implica, segundo a figura 24 em diminuir Kp1 e diminuir também o Kp2.
- Considere agora que a saída 1 esteja lenta e a saída 2 oscilatória, segundo o quadro 47 a saída lenta corresponde ao número "0" e a saída oscilatória corresponde ao número "1", ou seja, utilizaremos dessa vez o sentido de percurso "5". E por fim analisando a figura 24, indica que temos que aumentar o Kp1 e diminuir o valor de Kp2.
- Se a saída 1 for boa e a saída 2 também, adotamos o sentido de percurso 6. Nesse caso resulta em manter o ponto de ajuste na mesma coordenada.

O ajuste fino que foi descrito permite realizar alterações nos valores do ganho de  $K_{p1}$  e  $K_{p2}$  de modo que possa variar as condições do sistema e tentar fazer com que esses novos valores estabeleçam uma melhoria no controle do processo.

Realizar ajustes em TI e TD são procedimentos críticos, como já vimos o ajuste nesses parâmetros podem levar o sistema à instabilidade. A metodologia proposta também oferece ao usuário artifícios para que ele consiga realizar o ajuste do sistema quando ocorre problemas, por exemplo, o processo se torna instável motivado por alguma modificação decorrente de alguma etapa de refinamento. De acordo com Alves (1988) um aumento exagerado no tempo de integração (TI) pode descaracterizar a ação integradora do controle ou, diminuição substancial no tempo de derivação (TD) pode vir anular a ação derivativa.

A seguir veremos algumas situações que podem vir a ocorrer e as medidas que os usuários devem tomar para tentar contornar essa adversidade.

**1° Problema:** Instabilidade no sistema ao aplicar o controle grosso PI, ajuste fino em  $K_{pi}$  não surte efeito.

Deve-se então:

- Anular o último ajuste fino realizado em  $K_p$ ;
- Dobrar o valor da constante TI;
- Verificar os efeitos.

Esse tratamento deve ser aplicado no máximo duas vezes, para que seja conservado a ação integradora do controle.

**2° Problema:** Instabilidade no sistema ao aplicar controle grosso PID, ajuste fino em  $K_{pi}$  não surte efeito.

Deve-se então:

- Anular o último ajuste fino realizado em  $K_p$ ;
- Reduzir à metade o valor de TD (1ª providência);
- Verificar os efeitos;
- Voltar ao valor antigo de TD e dobrar o valor de TI (2ª providência);
- Verificar os efeitos;
- Reduzir à metade o valor de TD e manter o valor de TI conforme foi executado na 2ª providência (3ª providência);

- Verificar os efeitos.

Novamente, esse tratamento deve ser aplicado no máximo duas vezes, para que seja conservado as ações integradoras e derivativas do controle.

Até esse ponto foi mostrado como executar o ajuste em processos TITO utilizando o controlador PID desenvolvido pelo Alves (1988). Todo o procedimento é empírico e baseado em diversas literaturas de controle. Deve-se então executar os procedimentos e avaliar quantitativamente se essa metodologia têm de fato alguma aplicabilidade.

Antes de desenvolver o método na prática utilizando o Matlab com o simulador criado no GUI e realizar comparação com os valores encontrados por Alves (1988) com seu simulador construído no XT 2002, vale a pena fazer algumas ressalvas importantes e a conjuntura do fluxograma que molda a metodologia demonstrado pelo conjunto das Figuras 25, 26 e 27.

Para o ajuste fino em  $K_p$  adotou-se como medida do grau de oscilações da saída, a porcentagem de *overshoot* e o tempo de subida, seu arranque inicial, e o tempo de estabilização que é a rapidez para atingir o regime.

Em relação à variação do ganho proporcional, é de grande importância para usuário entender que foi avaliado um valor de 50% tanto para mais como para menos, a fim de tentar alcançar o objetivo de controle de processos multivariáveis.

Todo ajuste fino realizado após o ajuste grosso deve, obrigatoriamente, ser executado apenas quando ele for agregado a uma melhora nos índices do sistema utilizado. E lembrando que, o ajuste fino é opcional e deve ser realizado apenas quando o usuário achar que necessite.

### 5.3. FLUXOGRAMA DE UTILIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO

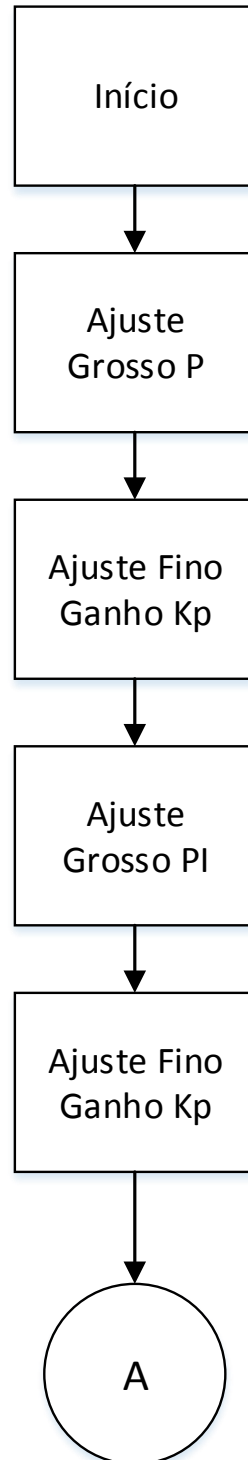


Figura 25 - Fluxograma, Primeira Parte  
Fonte: Alves (1988), adaptado pelo Autor.

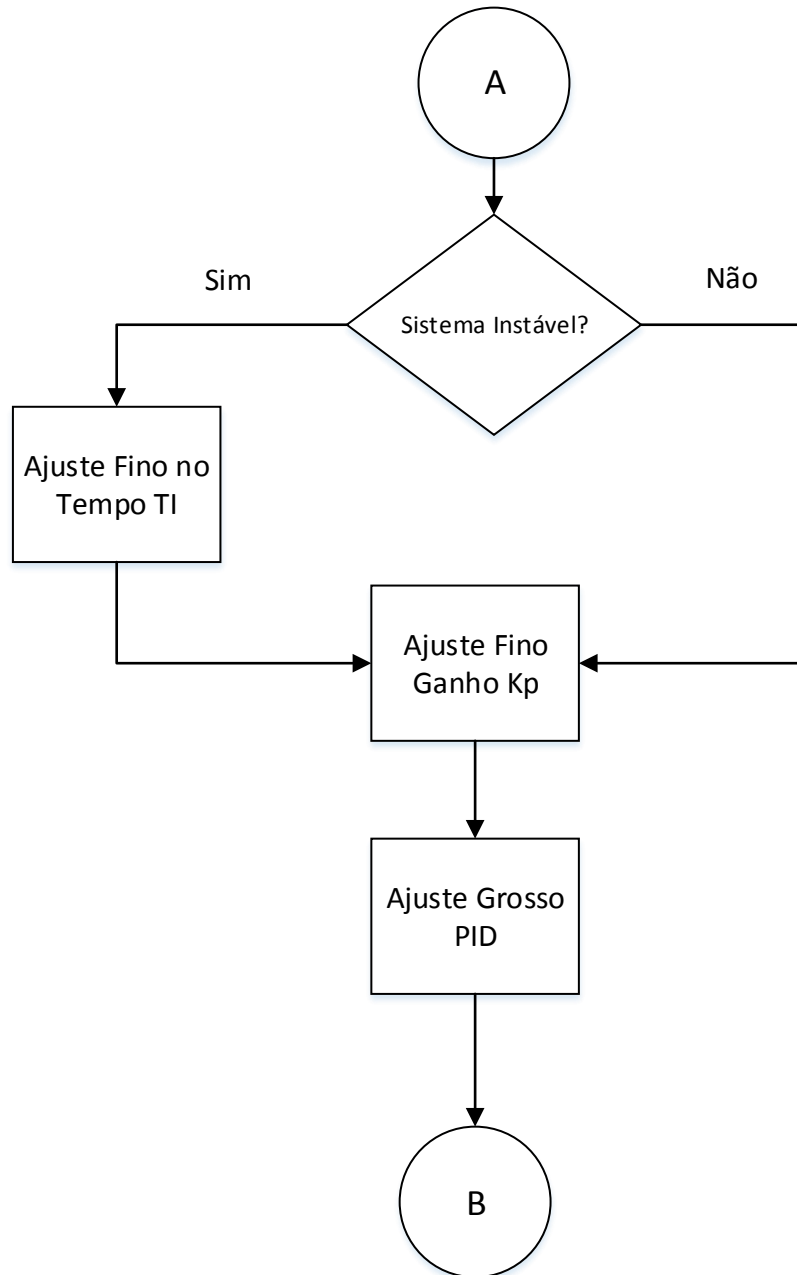


Figura 26 - Fluxograma, Segunda Parte  
Fonte: Alves (1988), adaptado pelo Autor.

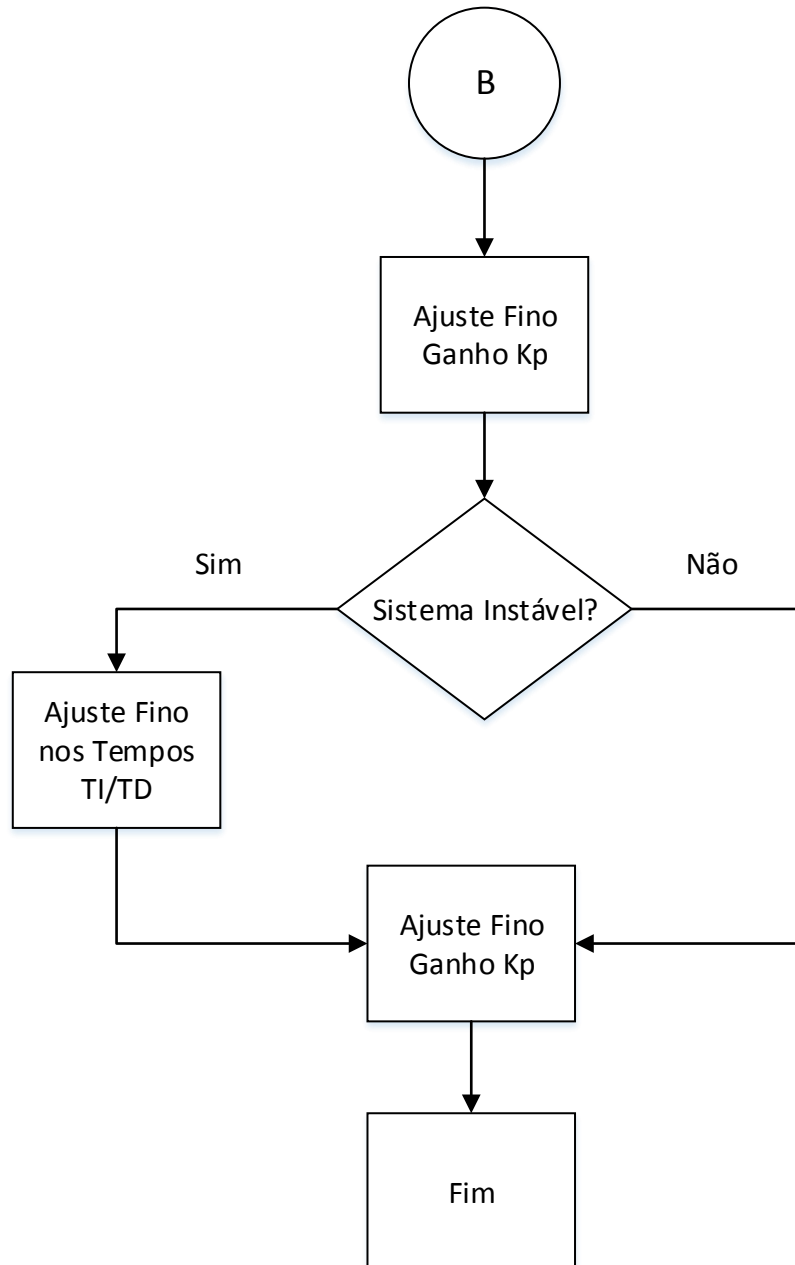


Figura 27 - Fluxograma, Terceira Parte  
Fonte: Alves (1988), adaptado pelo Autor.

## 5.4. Aplicação da Metodologia

Os processos que serão utilizadas para aplicação da metodologia proposta pelo Alves (1988), são os mesmos descritos no capítulo 4, todos eles são processos de duas entradas e duas saídas com a ligação cruzada utilizando o controlador PID conforme mostrada na figura 9. Como não há especificações conhecidas desses processos, o elemento comparatório se dará através dos dados fornecidos pelo Alves (1988) e o do autor desse trabalho utilizando o Matlab.

O autor Alves (1988) determinou alguns critérios hipotéticos para aplicação de sua metodologia:

**PO > 0%**

Alto Grau de Oscilação

**PO < 0%**

Baixo Grau de Oscilação

### 5.4.1. PRIMEIRO PROCESSO

Será mencionado novamente alguns parâmetros que já foram encontrados do primeiro processo, conforme o Quadro 48:

|                                 | <b>Kp1máx</b> | <b>Tosc1</b> | <b>Kp2máx</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 0.12          | 196.5        | -3.6          | 4.5          |
| <b>Autor</b>                    | 0.132         | 220          | -3.4          | 4.18         |

Quadro 48 - Pontos A e B, Primeiro Processo

Fonte: Autor

Lembrando que *Kp1máx* se refere o ponto A e *Kp2máx* se refere ao ponto B, são os valores que representam os limites de estabilidade do processo estudado.

Os pontos intermediários do sistema estão representados no Quadro 49.

|                             | Ponto C |      | Ponto D |      |
|-----------------------------|---------|------|---------|------|
|                             | Kp1     | Kp2  | Kp1     | Kp2  |
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 0.06    | -3.6 | 0.12    | -1.8 |
| <b>Autor</b>                | 0.066   | -3.4 | 0.132   | -1.7 |

Quadro 49 - Pontos C e D, Primeiro Processo  
Fonte: Autor

Em seguida, conforme a metodologia descrita deve-se encontrar os três pontos para determinar o melhor entre eles, ilustrado pelo Quadro 50.

|                | Kp1  | Kp2  |
|----------------|--|--|
| <b>Ponto 1</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto C})$ $Kp1 = 0.6 * 0.066$ $Kp1 = 0.0396$               | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto C})$ $Kp2 = 0.6 * -3.4$ $Kp2 = -2.04$             |
| <b>Ponto 2</b> | $Kp1 = \frac{Kp1(C) + Kp1(D)}{2}$ $Kp1 = \frac{0.0396 + 0.0792}{2}$ $Kp1 = 0.0594$ | $Kp2 = \frac{Kp2(C) + Kp2(D)}{2}$ $Kp2 = \frac{-2.04 - 1.02}{2}$ $Kp2 = -1.53$ |
| <b>Ponto 3</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto D})$ $Kp1 = 0.6 * 0.132$ $Kp1 = 0.0792$               | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto D})$ $Kp2 = 0.6 * -1.7$ $Kp2 = -1.02$             |

Quadro 50 - Determinação dos pontos 1,2 e 3  
Fonte: Autor

Com a determinação de todos esses pontos, foi possível criar a região de estabilidade proposto por Alves (1988), com os valores de ambos autores conforme indicado pelas próximas Figuras 28 e 29.

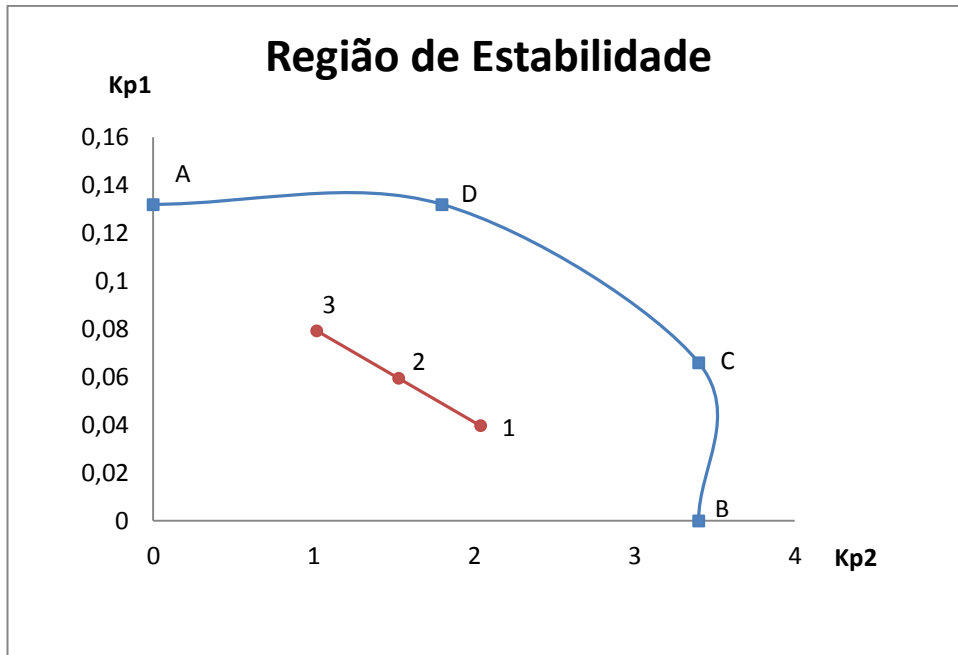


Figura 28 - Região de Estabilidade, Dados do Alves  
Fonte: Alves (1988), adaptada pelo Autor.

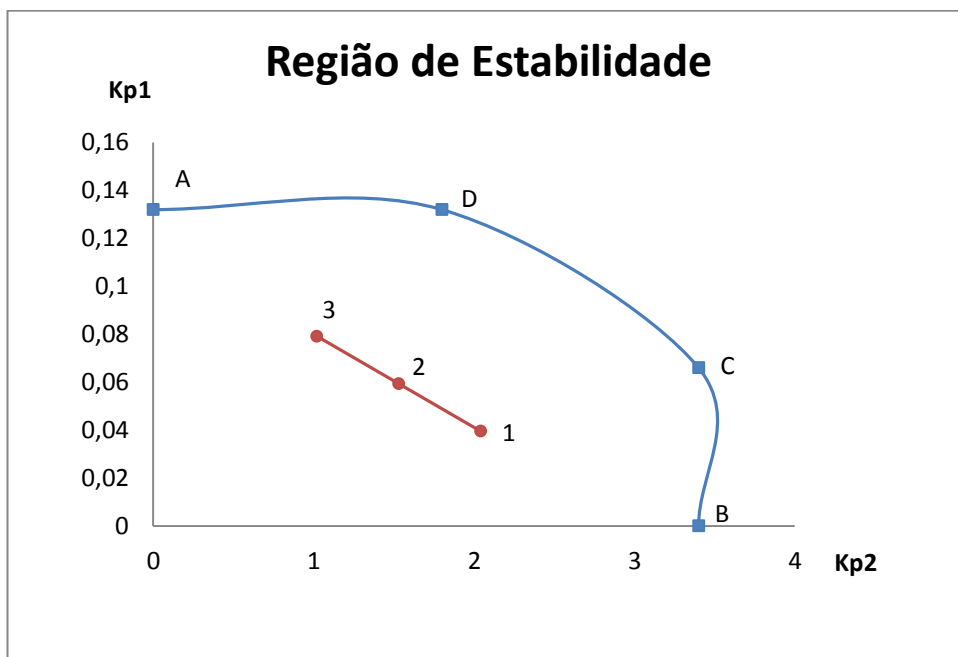


Figura 29 - Região de Estabilidade, Dados do Autor  
Fonte: Autor.

Após a determinação dos pontos, deve-se dar prosseguimento na realização do ITAE ponderado afim de descobrir qual ponto que será utilizado. Para isso, basta alocar os novos valores de  $K_{p1}$  e  $K_{p2}$  no simulador e verificar quanto equivale o ITAE das respectivas saídas, conforme os Quadros 51 e 52.

|                | <b>ITAE SAÍDA 1</b> | <b>ITAE SAÍDA 2</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|
| <b>PONTO 1</b> | 69864.6             | 4138.52             |
| <b>PONTO 2</b> | 58038.6             | 5085.31             |
| <b>PONTO 3</b> | 48215.1             | 6973.23             |

Quadro 51 - Determinação do ITAE  
Fonte: Autor

Com os dados do ITAE de cada saída, pode-se aplicar o ITAE ponderado, conforme mostra o quadro abaixo:

|                | <b>ITAE PONDERADO</b>  |
|----------------|--|
| <b>PONTO 1</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{69864.6 + 4138.52}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 37002$ |
| <b>PONTO 2</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{58038.6 + 5085.31}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 31562$ |
| <b>PONTO 3</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{48215.1 + 6973.23}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 27594$ |

Quadro 52 - Determinação do ITAE ponderado  
Fonte: Autor

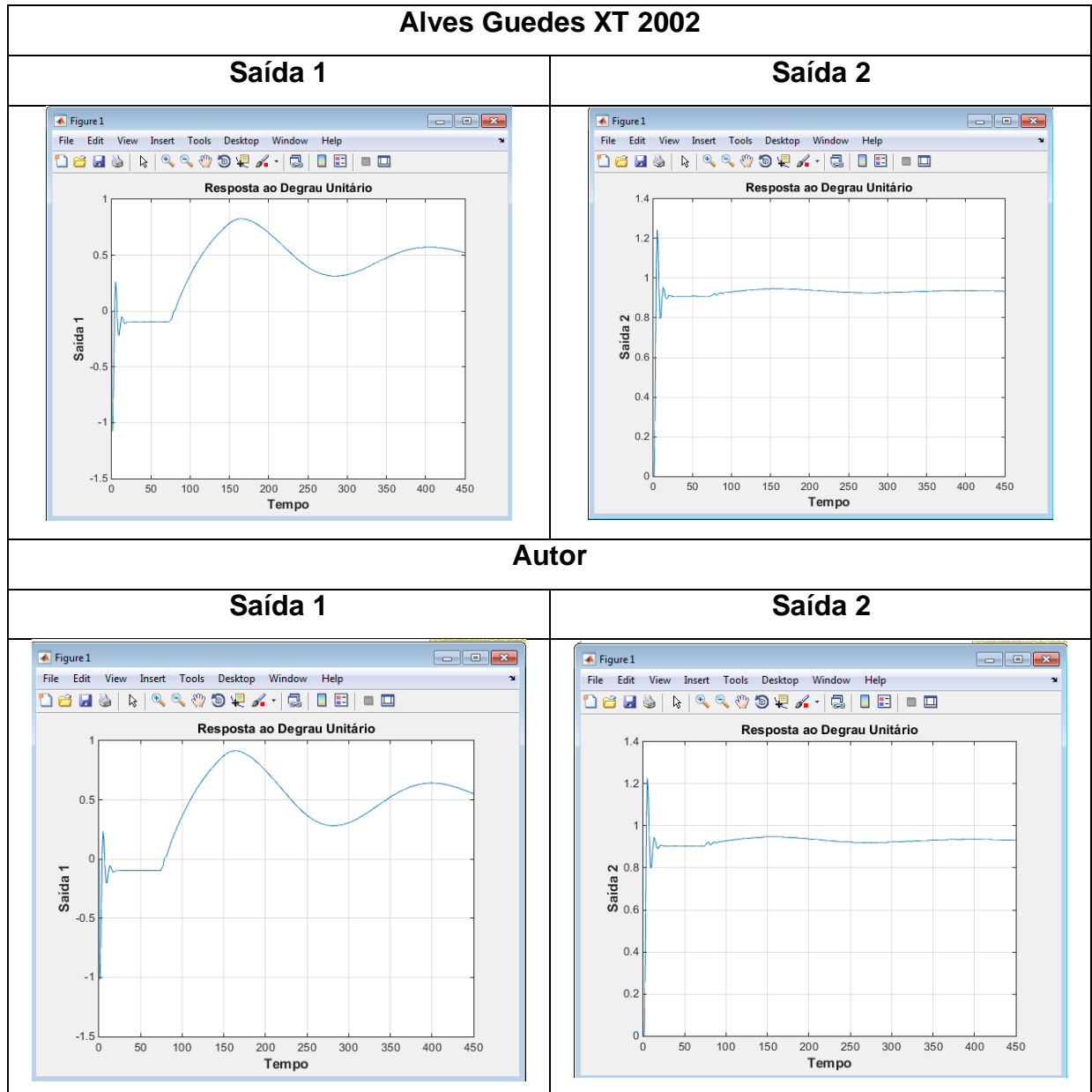
O ponto que deve ser utilizado para dar sequência ao método é o ponto 3, pois o seu valor de ITAE ponderado é o menor entre todos. Os valores de Kp1 e Kp2 referente ao ponto 3 nos indica o valor do ajuste grosso do controlador proporcional, esses parâmetros de partida podem ser visualizadas no Quadro 53.

### **AJUSTE GROSSO PROPORCIONAL**

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>ITAE ponderado</b> |
|---------------------------------|------------|------------|-----------------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 0.072      | -1.08      | 2800000               |
| <b>Autor</b>                    | 0.0792     | -1.02      | 27594                 |

Quadro 53 - Ajuste Grosso : Proporcional

Fonte: Autor



Quadro 54 - Saídas : Ajuste Grosso Proporcional  
 Fonte: Autor

Pode-se observar que o gráfico do quadro 54, a saída 1 não conseguiu atingir o valor referente, portanto apresenta lentidão na resposta. Enquanto a saída 2 apresenta um grande número de oscilação na resposta.

Será observado alguns dados da resposta do quadro 55.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 4847000                 | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 51650                   | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 48215.1                 | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 694000                  | 37.91                            | 1.5                        | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 6751                    | 24.45                            | 1.8                        | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 6973.23                 | 22.58                            | 1.9                        | Não<br>determinado                |

Quadro 55 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional

Fonte: Autor

Aplicando a metodologia descrita por Alves (1988) para a realização do ajuste fino obtém-se que a saída 1 é lenta, que corresponde a “0” e a saída 2 é oscilatória corresponde a “1”, então obtém-se que o sentido do percurso adotado, segundo a quadro 47, será o sentido na direção “5”.

O sentido de percurso 5 nos informa que deve-se aumentar o valor de Kp1 e diminuir o valor de Kp2.

## AJUSTE FINO PROPORCIONAL

Como já foi discutido anteriormente, após cada ajuste grosso é efetuado o ajuste fino, e o valor que deve ser adotado para o aumento ou decréscimo é 50% do substancial utilizado no ajuste grosso.

|                                 | <b>KP1</b>   | <b>KP2</b>   |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 1,5$<br>$Kp1 = 0.072 * 1,5$<br>$Kp1 = 0.108$   | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0,5$<br>$Kp2 = -1.08 * 0,5$<br>$Kp2 = -0.54$ |
| <b>Autor</b>                    | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 1,5$<br>$Kp1 = 0.0792 * 1,5$<br>$Kp1 = 0.1188$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0,5$<br>$Kp2 = -1.02 * 0,5$<br>$Kp2 = -0.51$ |

Quadro 56 - Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

Pode-se observar na figura 31, que foi possível com a realização do ajuste fino melhorar consideravelmente o *overshoot* da saída 2. Em relação a saída 1, demonstrou-se uma oscilação e em contratida conseguiu atingir o valor de referência e com isso, identificar o tempo de subida.

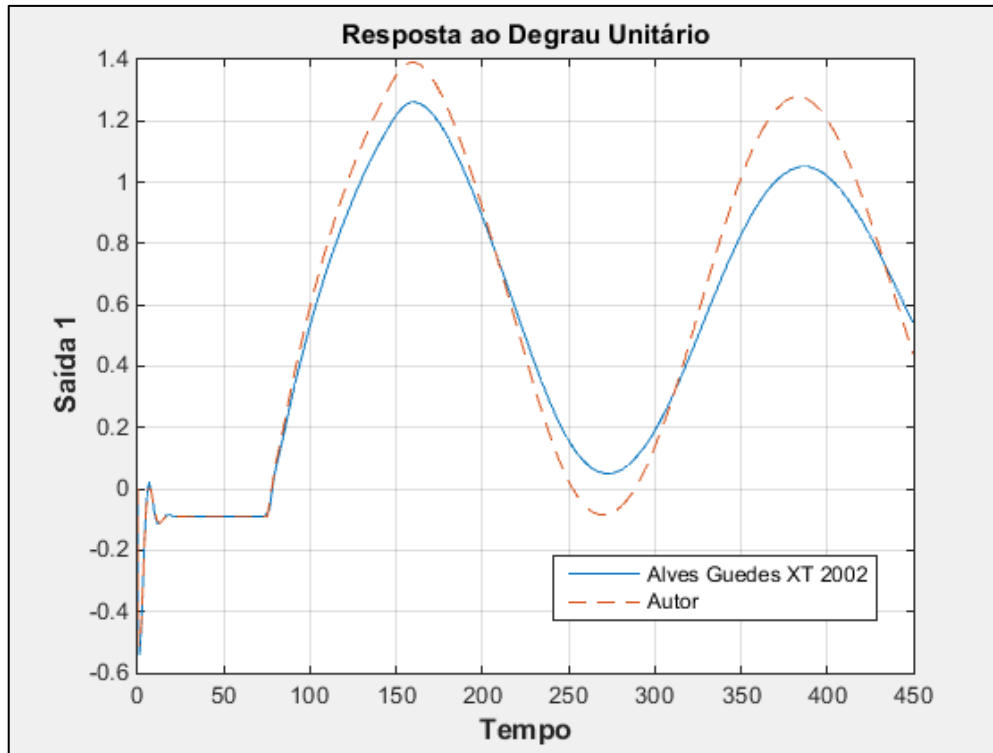


Figura 30 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional.  
Fonte: Autor.

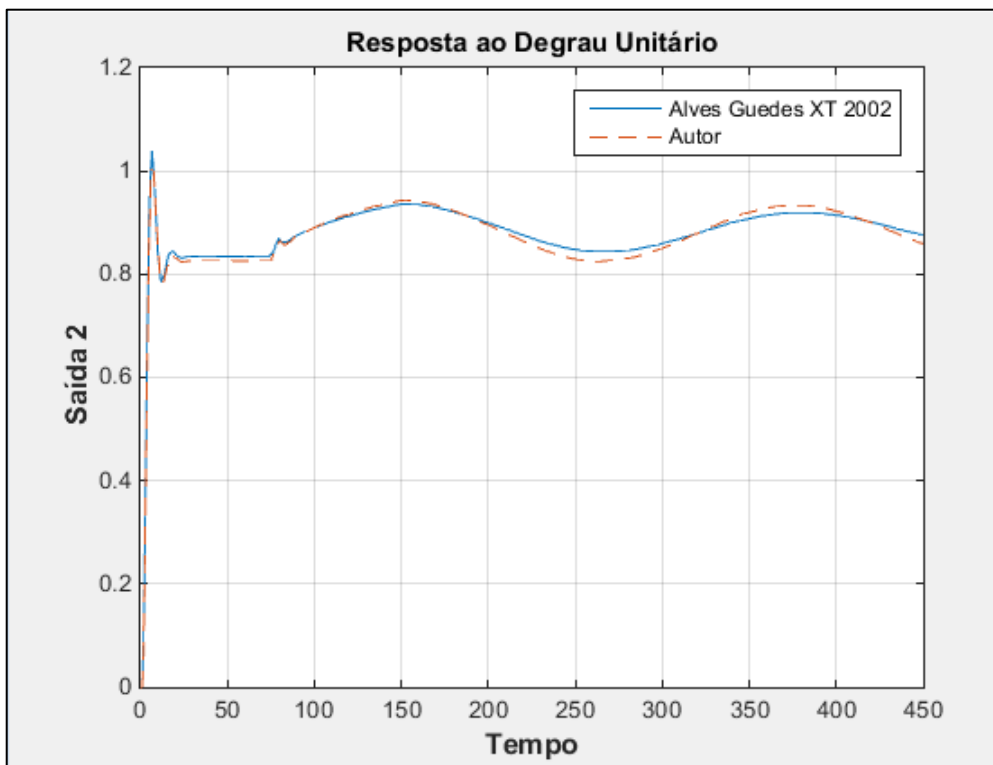


Figura 31 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional.  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 3553000                 | 19.61                            | 45                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 38466.9                 | 26.21                            | 41                         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 43985                   | 39.17                            | 35                         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1155000                 | 10.00                            | 3                          | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 11151.8                 | 3.91                             | 3.5                        | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 11302.9                 | 0.39                             | 3.4                        | Não<br>determinado                |

Quadro 57 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

Dando sequência à metodologia, iremos agora realizar o ajuste grosso no controlador PI.

## AJUSTE GROSSO PI

Aplicando o ajuste descrito pelo Alves (1988) obtém-se:

|   |   |
|---|---|
| <p style="text-align: center;"><b>Kp1</b></p> | $Kp1 (PI) = 0.9 Kp1$ $Kp1 (PI) = 0.9 * 0.1188$ $Kp1 (PI) = 0.1069$  |
| <p style="text-align: center;"><b>TI1</b></p> | $TI1(PI) = 0.85 T_{osc1}$ $TI1(PI) = 0.85 * 220$ $TI1(PI) = 187$    |
| <p style="text-align: center;"><b>Kp2</b></p> | $Kp2 (PI) = 0.9 Kp2$ $Kp2 (PI) = 0.9 * -0.51$ $Kp2 (PI) = -0.4590$  |
| <p style="text-align: center;"><b>TI2</b></p> | $TI2(PI) = 0.85 T_{osc2}$ $TI2(PI) = 0.85 * 4.18$ $TI2(PI) = 3.553$ |

Quadro 58 - Ajuste Grosso PI

Fonte: Autor

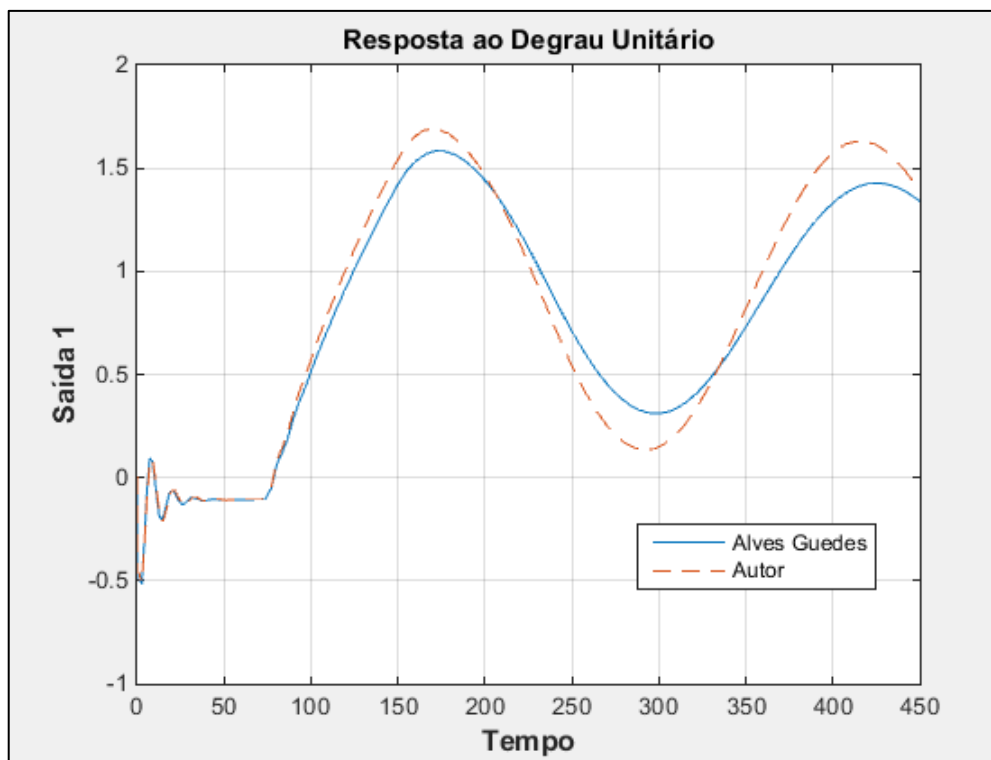


Figura 32 - Saída 1, Ajuste Grosso PI.  
Fonte: Autor.

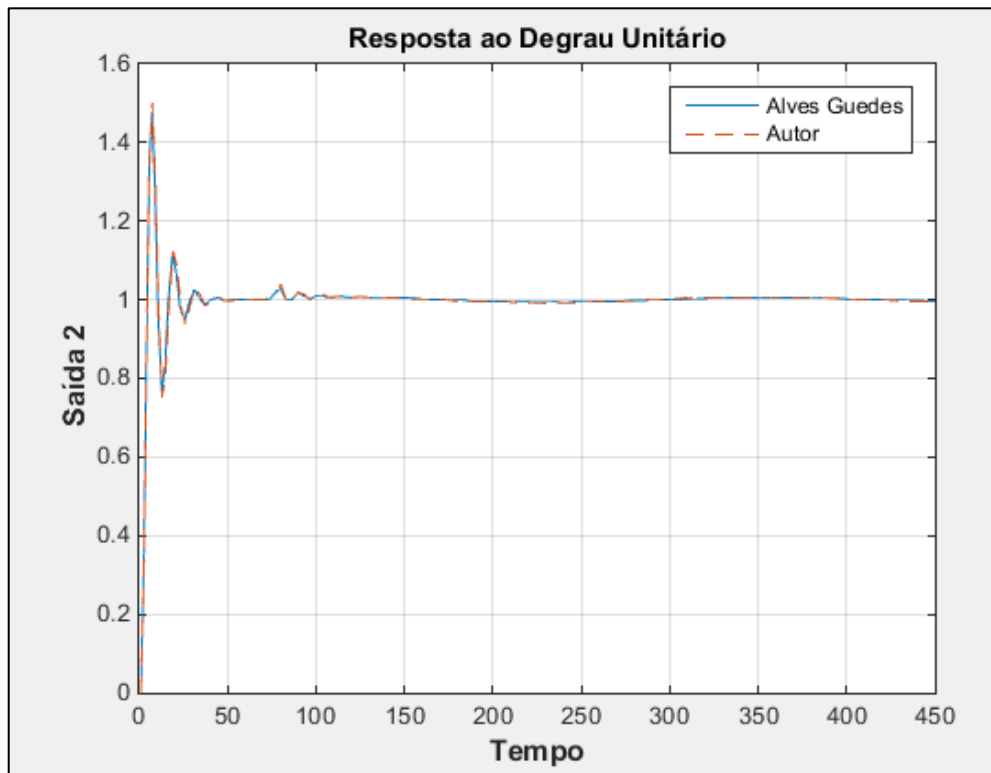


Figura 33 - Saída 2, Ajuste Grosso PI.  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 3295000                 | 46.99                            | 42                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 41005.3                 | 58.40                            | 38                         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 51602                   | 68.93                            | 34                         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 38000                   | 60.46                            | 2.5                        | 33                                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 401.26                  | 47.95                            | 2.5                        | 27                                |
| <b>Autor</b>                        | 520.65                  | 50.09                            | 2.7                        | 27                                |

Quadro 59 - Resultado: Ajuste Grosso PI

Fonte: Autor

Pode-se analisar que após o ajuste grosso no controlador PI os erros diminuíram significativamente e a saída 2 agora chega rapidamente no valor de referência, o que não acontecia antes. Ambas as saídas estão com comportamento oscilatórios.

### **AJUSTE FINO PI**

Dando seguimento, tanto a saída 1 quanto a saída 2 estão oscilando então obtém-se que adotar o sentido do percuso igual a "1", isso nos leva a diminuir o valor de  $K_{p1}$  e  $K_{p2}$ .

|              | <b>KP1</b>  | <b>KP2</b>   |
|--------------|---|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = 0.1069 * 0.5$<br>$Kp1 = 0.05345$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = -0.4590 * 0.5$<br>$Kp2 = -0.2295$ |

Quadro 60 - Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

Observando os dados a seguir, pode-se dizer que o objetivo de reparar a oscilação na saída 1 foi corrigida e na saída 2 teve uma diminuição razoável mas ainda possui um alto valor de overshoot. Por causa disso, será necessário novamente realizar um novo ajuste fino no controlador PI para que seja possível tentar amenizar ainda mais esse fator na saída 2.

O segundo ajuste fino no controlador PI foi feito de maneira que o valor da saída 1 não esteja com um alto grau de oscilação, isso implicou em permanecer com o seu valor atual e mudar apenas o valor da saída 2. Aplicando o quadro criada pelo Alves (1988) estipulado que a saída 1 esteja de acordo com que o usuário deseja e querendo tentar corrigir apenas o overshoot da saída 2, então o sentido do percurso que será adotado nesse novo ajuste é o sentido número “3”.

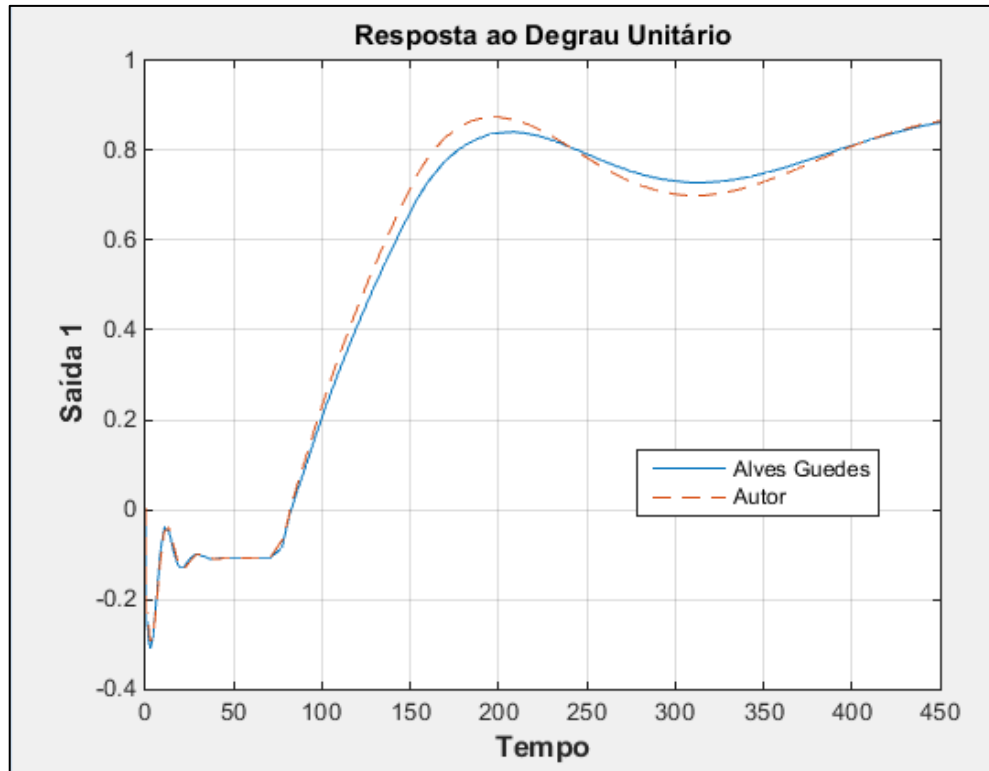


Figura 34 - Saída 1, Ajuste Fino PI.  
Fonte: Autor.

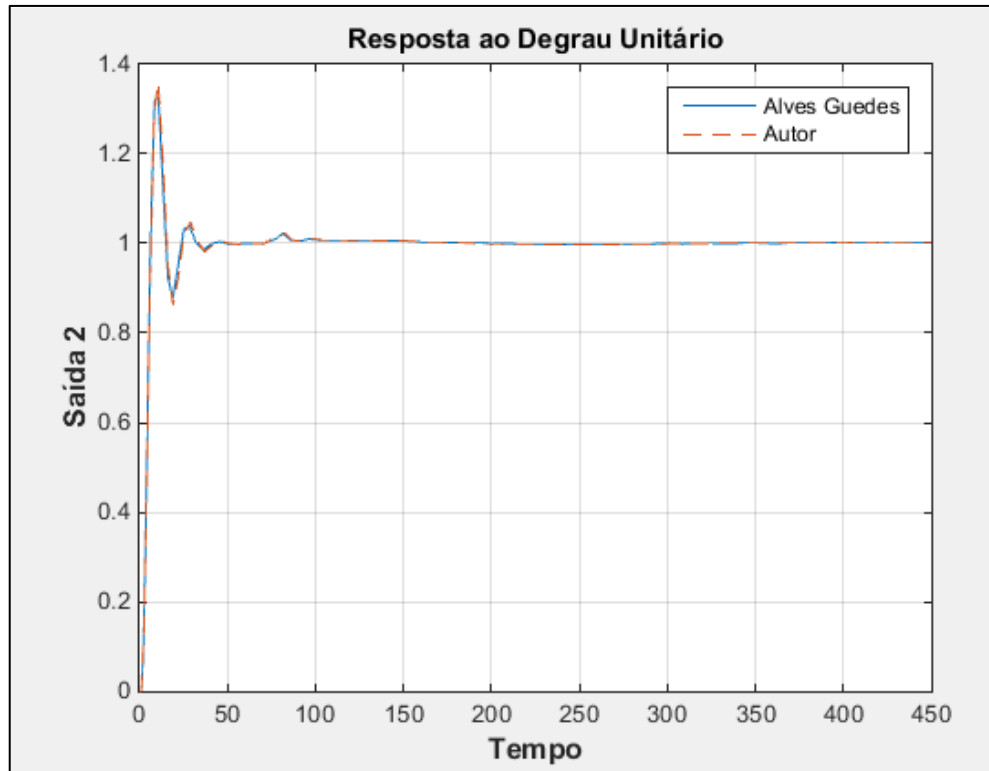


Figura 35 - Saída 2, Ajuste Fino PI.  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2627000                 | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 27564.6                 | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 27558                   | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 217000                  | 25.30                            | 3.5                        | 28.5                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 205                     | 32.51                            | 3.6                        | 22                                |
| <b>Autor</b>                        | 231                     | 35.92                            | 3.7                        | 22.8                              |

Quadro 61 - Resultados: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

**AJUSTE FINO PI**

|              | <b>KP1</b> | <b>KP2</b>  |
|--------------|------------|---|
| <b>Autor</b> | OK         | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = -0.2295 * 0.5$<br>$Kp2 = -0.11475$ |

Quadro 62 - Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

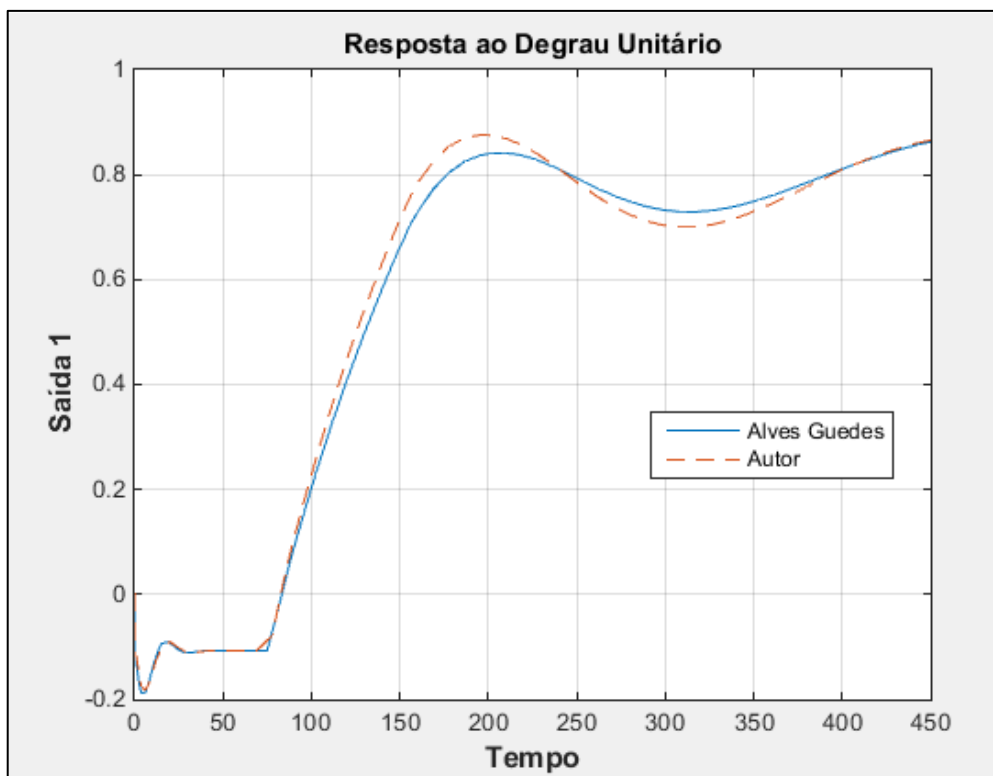


Figura 36 - Saída 1, Ajuste Fino PI.  
Fonte: Autor.

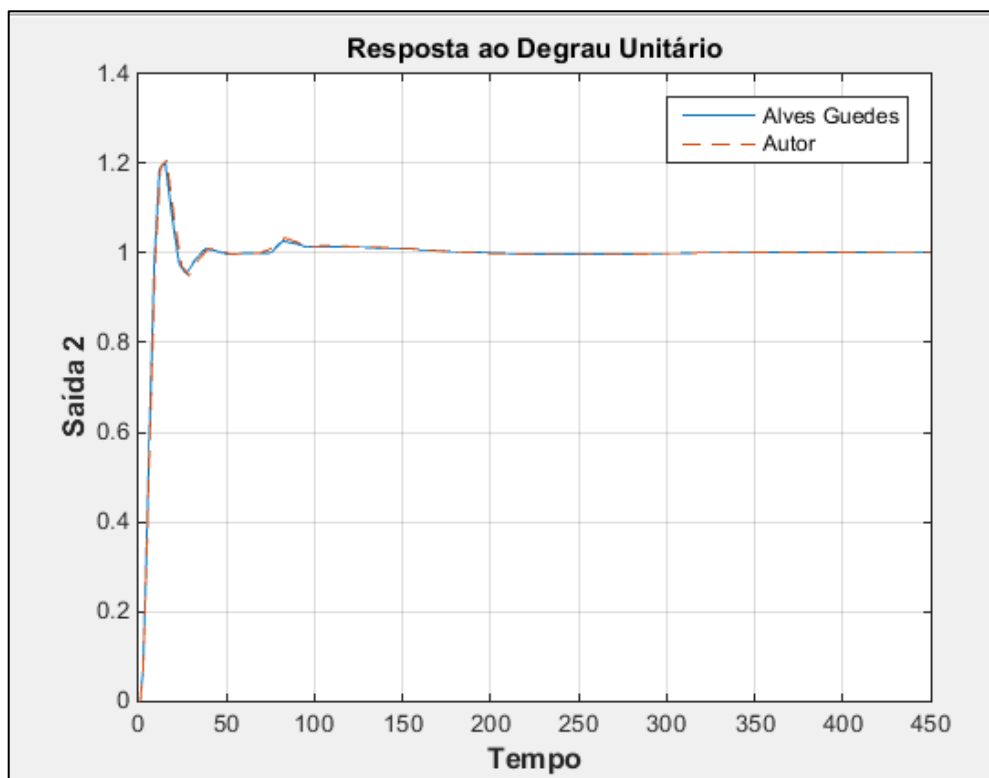


Figura 37 - Saída 2, Ajuste Fino PI.  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2627000                 | 41.99                            | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 27583.9                 | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 27576                   | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 30000                   | 25.30                            | 5.5                        | 28.5                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 331.92                  | 20.28                            | 5.68                       | 20                                |
| <b>Autor</b>                        | 401                     | 20.82                            | 6                          | 21                                |

Quadro 63 - Resultados: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

Pode-se analisar que com a efetuação de um novo ajuste fino no controle PI foi possível diminuir ainda mais o overshoot da saída 2. O ajuste feito pelo simulador do Alves (1988) apareceu um alto valor de oscilação na saída 1, o que não ocorre quando trabalhado esses mesmos dados através do Matlab.

Como o tempo de estabilização se mostrou inalterado após a realização de dois ajustes finos, será dado sequência no ajuste final que é o controle PID.

## AJUSTE GROSSO PID

Segundo a metodologia descrita pela Alves (1988) obtém-se os seguintes valores nos parâmetros do controle PID:

|            |  |
|------------|--|
| <b>Kp1</b> | $Kp1(PID) = 1.2 Kp1(PI)$ $Kp1(PID) = 1.2 * 0.05345$ $Kp1(PID) = 0.06414$       |
| <b>TI1</b> | $TI1 (PID) = 0.6 TI1(PI)$ $TI1 (PID) = 0.6 * 187$ $TI1 (PID) = 122.2$          |
| <b>TD1</b> | $TD1 (PID) = 0.25 TI1 (PID)$ $TD1 (PID) = 0.25 * 122.2$ $TD1 (PID) = 30.55$    |
| <b>Kp2</b> | $Kp2(PID) = 1.2 Kp2(PI)$ $Kp2(PID) = 1.2 * (-0.11475)$ $Kp2(PID) = -0.1377$    |
| <b>TI2</b> | $TI2 (PID) = 0.6 TI2(PI)$ $TI2 (PID) = 0.6 * 3.553$ $TI2 (PID) = 2.1318$       |
| <b>TD2</b> | $TD2 (PID) = 0.25 TI2 (PID)$ $TD2 (PID) = 0.25 * 2.1318$ $TD2 (PID) = 0.53295$ |

Quadro 64 - Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 892000                  | 2.42                             | 61                         | 289.5                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | Instabilidade           | Instabilidade                    | Instabilidade              | Instabilidade                     |
| <b>Autor</b>                        | Instabilidade           | Instabilidade                    | Instabilidade              | Instabilidade                     |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 56000                   | 47.13                            | 4                          | 154.5                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | Instabilidade           | Instabilidade                    | Instabilidade              | Instabilidade                     |
| <b>Autor</b>                        | Instabilidade           | Instabilidade                    | Instabilidade              | Instabilidade                     |

Quadro 65 - Resultado Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

Após a execução do ajuste grosso no controlador PID, as saídas ficaram instáveis impossibilitando o andamento dos demais ajustes. Vale ressaltar que o simulador do Alves (1988) foi capaz de realizar o ajuste sem que as saídas sofressem algum problema, já o Matlab não alcançou o mesmo resultado. Portanto, iremos agora tentar solucionar esse obstáculo seguindo alguns métodos que já foram descritos anteriormente quando o controle PID fosse levado a instabilidade, é o caso do Problema 2.

O primeiro procedimento a ser adotado é reduzir em 50% o valor do tempo de derivação(TD) e verificar. Após ter diminuído pela metade o valor de TD, não houve nenhuma mudança.

O próximo passo é anular o último ajuste fino realizado em Kp e novamente realizar a verificação. Após a execução das etapas acima, o sistema ainda se manteve instável.

Então partiremos para próxima etapa que segundo Alves (1988) deve-se voltar com o valor do tempo de derivação que foi encontrado pelo ajuste grosso PID e então nós deve-se dobrar o valor do tempo de integração (TI). O sistema ainda se mostrou instável.

Vamos agora para a última medida que pode ser tomada, deve-se diminuir em 50% o valor do TD e manter o valor do tempo de integração (TI) conforme foi feito na etapa anterior.

O primeiro processo se mostrou não suscetível à aplicação do ajuste grosso PID e conseqüentemente torna-se inviável fazer a aplicação do ajuste fino.

#### 5.4.2. SEGUNDO PROCESSO

Dando seguimento, será executado agora o ajuste no segundo processo que foi abordado no presente trabalho. Os parâmetros de ganho crítico já foram coletados e serão novamente conotados:

|                                 | <b>Kp1máx</b> | <b>Tosc1</b> | <b>Kp2máx</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 8.3           | 1.02         | 2.3           | 1.47         |
| <b>Autor</b>                    | 9.05          | 0.9          | 2.3           | 1.3          |

Quadro 66 - Pontos A e B, Segundo Processo  
Fonte: Autor

|                             | <b>Ponto C</b> |            | <b>Ponto D</b> |            |
|-----------------------------|----------------|------------|----------------|------------|
|                             | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> |
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 4.15           | 0.4        | 1.1            | 1.15       |
| <b>Autor</b>                | 4.525          | 0.52       | 1.15           | 1.1        |

Quadro 67 - Pontos C e D, Segundo Processo  
Fonte: Autor

Após determinados os pontos que compõe o limite da região de estabilidade, deve-se escolher o ponto onde o erro ITAE seja o menor possível.

|                | <b>Kp1</b>  | <b>Kp2</b>  |
|----------------|---|---|
| <b>Ponto 1</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto } C)$ $Kp1 = 0.6 * 4.525$ $Kp1 = 2.715$            | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto } C)$ $Kp2 = 0.6 * 0.52$ $Kp2 = 0.312$             |
| <b>Ponto 2</b> | $Kp1 = \frac{Kp1(C) + Kp1(D)}{2}$ $Kp1 = \frac{2.715 + 0.69}{2}$ $Kp1 = 1.7025$ | $Kp2 = \frac{Kp2(C) + Kp2(D)}{2}$ $Kp2 = \frac{0.312 + 0.66}{2}$ $Kp2 = 0.4860$ |
| <b>Ponto 3</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto } D)$ $Kp1 = 0.6 * 1.15$ $Kp1 = 0.69$              | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto } D)$ $Kp2 = 0.6 * 1.1$ $Kp2 = 0.66$               |

Quadro 68 - Determinação dos pontos 1,2 e 3

Fonte: Autor

|                | <b>ITAE SAÍDA 1</b> | <b>ITAE SAÍDA 2</b> |
|----------------|---------------------|---------------------|
| <b>PONTO 1</b> | 5.12                | 2.00                |
| <b>PONTO 2</b> | 6.79                | 1.84                |
| <b>PONTO 3</b> | 10.10               | 2.50                |

Quadro 69 - Determinação ITAE

Fonte: Autor

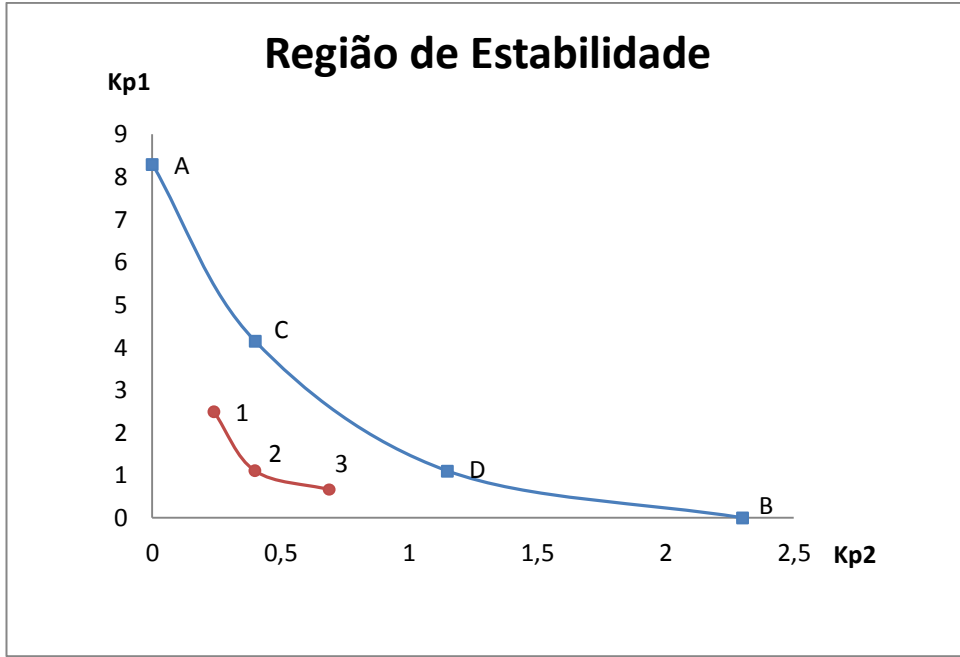


Figura 38 - Região de Estabilidade, Dados do Alves  
 Fonte: Alves (1988), adaptada pelo Autor.

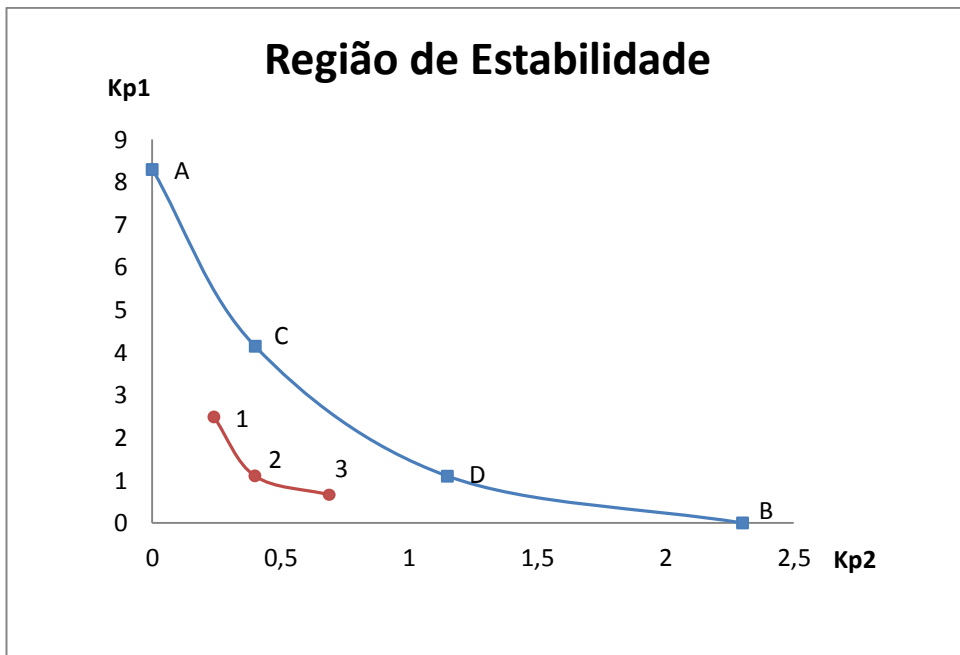


Figura 39 - Região de Estabilidade, Dados do Autor  
 Fonte: Autor.

|                | <b>ITAE PONDERADO</b>   |
|----------------|---|
| <b>PONTO 1</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{5.12 + 2.00}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 3.56$   |
| <b>PONTO 2</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{6.79 + 1.84}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 4.3150$ |
| <b>PONTO 3</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{10.10 + 2.50}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 6.3$   |

Quadro 70 - Determinação do ITAE ponderado.

Fonte: Autor

O ponto escolhido como base para os próximos passos de ajuste nos controladores foi o ponto 1, pois ele apresenta o menor valor de ITAE ponderado entre os demais pontos.

## AJUSTE GROSSO PROPORCIONAL

Dando sequência, será feito agora os ajustes no segundo processo, onde foi identificado o ponto que representa os parâmetros do ajuste grosso para o controle proporcional.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>ITAE ponderado</b> |
|---------------------------------|------------|------------|-----------------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 2.49       | 0.24       | 329                   |
| <b>Autor</b>                    | 2.715      | 0.312      | 3.56                  |

Quadro 71 - Ajuste Grosso : Proporcional

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 550.29                  | Não possui                       | Não<br>determinado         | Não<br>especificado               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 5.43                    | Não possui                       | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 5.12                    | Não há                           | Não<br>determinado         | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 107.29                  | 66.25                            | 0.23                       | Não<br>especificado               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.57                    | 64.80                            | 0.20                       | Não possui                        |
| <b>Autor</b>                        | 2.00                    | 79.07                            | 0.20                       | Não possui                        |

Quadro 72 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional  
 Fonte: Autor.

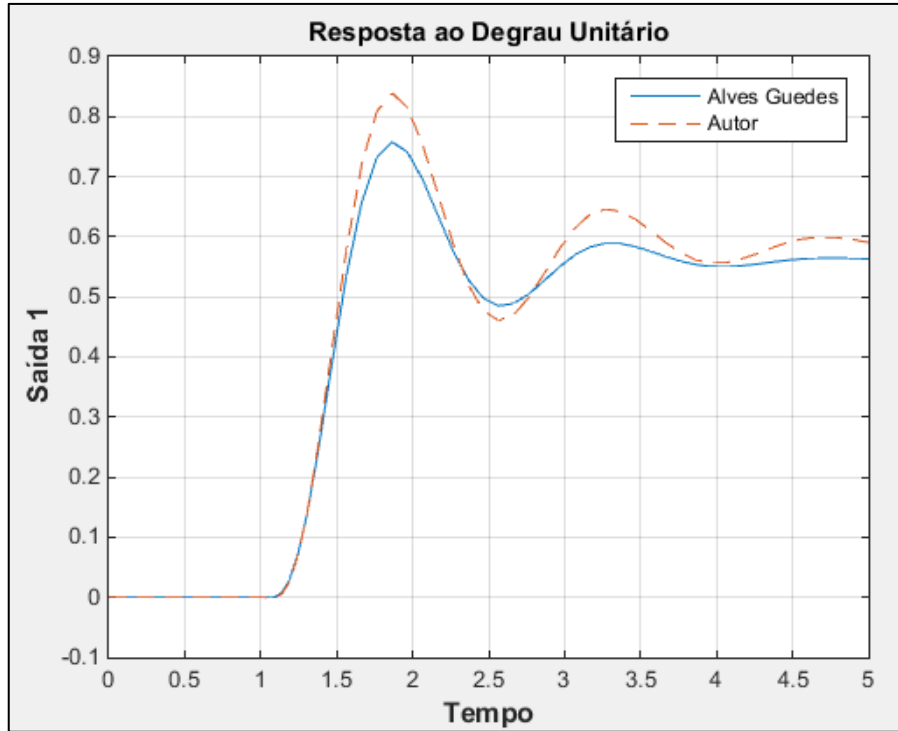


Figura 40 - Saída 1, Ajuste Grosso Proporcional  
 Fonte: Autor

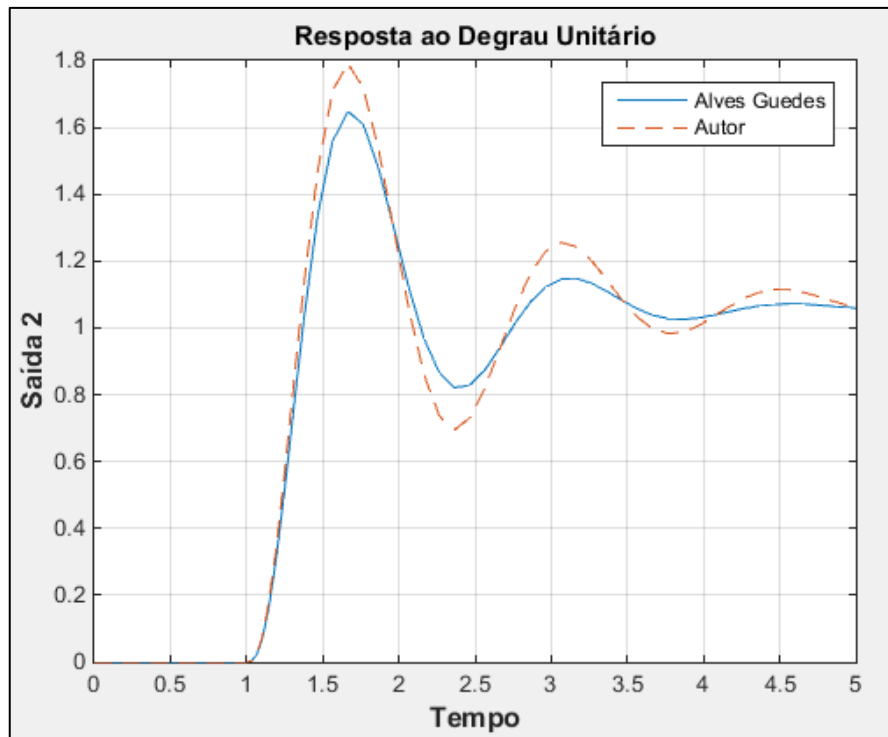


Figura 41 - Saída 2, Ajuste Grosso Proporcional  
 Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PROPORCIONAL

Para os resultados gerados deve-se efetuar o ajuste fino nos ganhos dos controladores seguindo o sentido do percurso número “5”, considerando que a saída 1 está lenta e a saída 2 está com algumas oscilações.

|              | <b>Kp1</b>                            | <b>Kp2</b>                            |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = 1.5 * 2.715$<br>$Kp1 = 4.0725$ | $Kp2 = 0.5 * 0.312$<br>$Kp2 = 0.1560$ |

Quadro 73 - Ajuste Fino : Proporcional

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 424.98                  | Não há                           | 0.4                        | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 4.28                    | Não há                           | 0.23                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 4.00                    | 1.05                             | 0.23                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 283.93                  | 103.58                           | 0.17                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 3.13                    | 0.94                             | 0.20                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 3.36                    | 115.32                           | 0.14                       | Não<br>determinado                |

Quadro 74 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor.

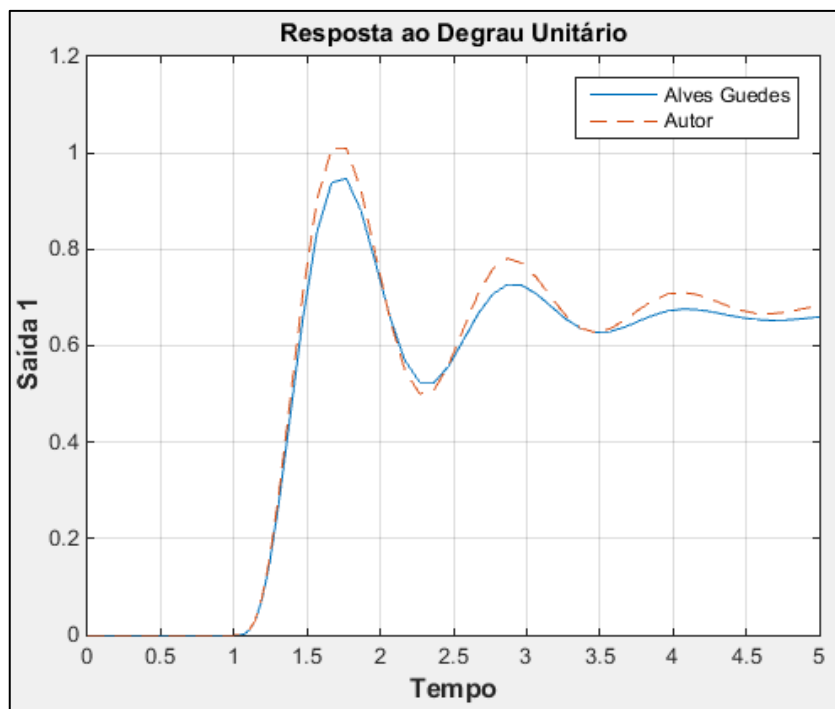


Figura 42 – Saída 1, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

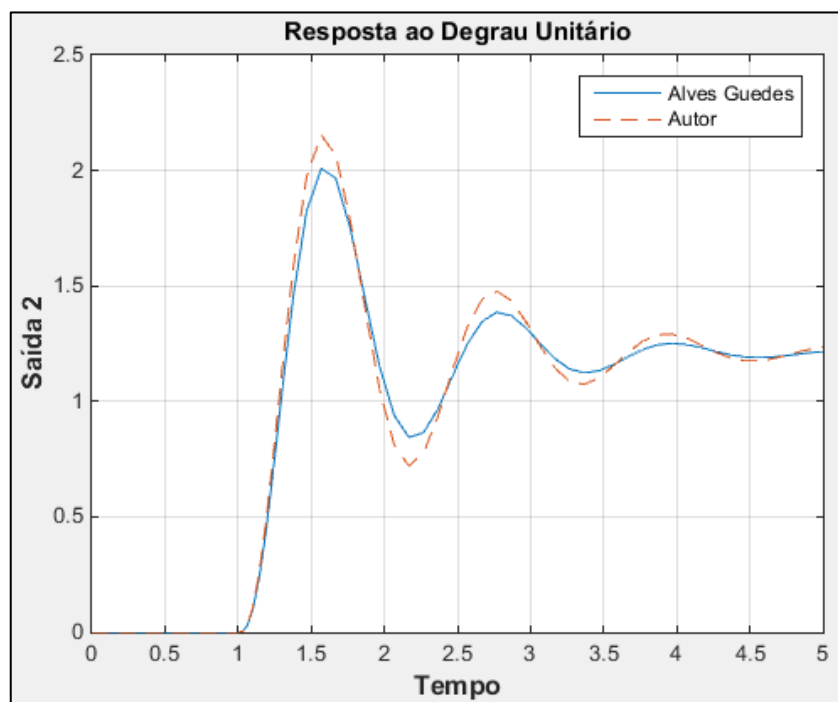


Figura 43 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

O ajuste acima surte pouco efeito, e ainda é possível notar que o overshoot da saída 2 aumentou, neste caso deve-se menosprezar esse ajuste fino e dar seqüência nos outros ajustes.

## AJUSTE GROSSO PI

Para o ajuste grosso no controlador proporcional integral temos:

|            |   |
|------------|---|
| <b>Kp1</b> | $Kp1 (PI) = 0.9 Kp1$ $Kp1 (PI) = 0.9 * 2.715$ $Kp1 (PI) = 2.4435$   |
| <b>TI1</b> | $TI1(PI) = 0.85 T_{osc1}$ $TI1(PI) = 0.85 * 0.9$ $TI1(PI) = 0.7650$ |
| <b>Kp2</b> | $Kp2 (PI) = 0.9 Kp2$ $Kp2 (PI) = 0.9 * 0.312$ $Kp2 (PI) = 0.2808$   |
| <b>TI2</b> | $TI2(PI) = 0.85 T_{osc2}$ $TI2(PI) = 0.85 * 1.3$ $TI2(PI) = 1.1050$ |

Quadro 75 - Ajuste Grosso PI

Fonte: Autor

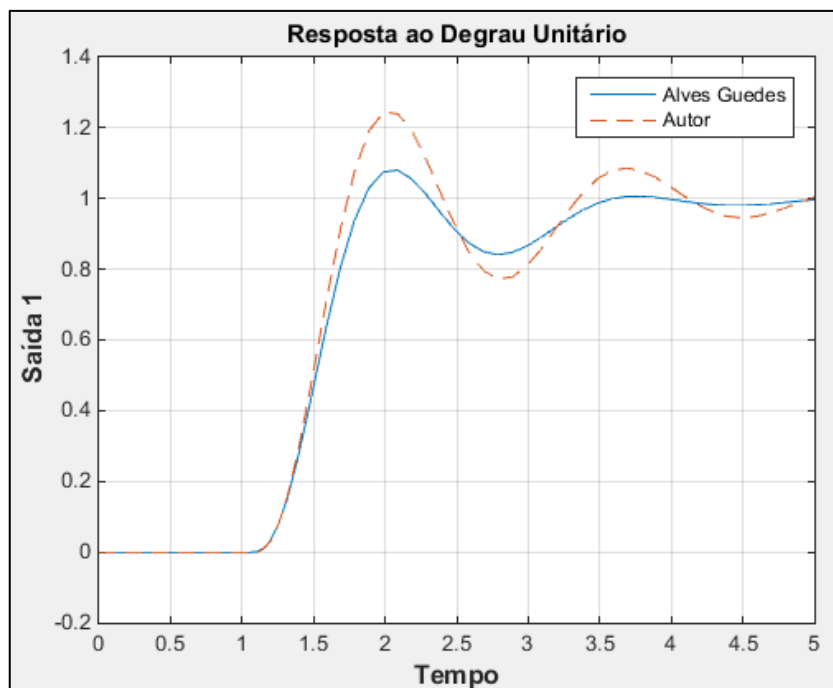


Figura 44 - Saída 1, Ajuste Grosso PI  
Fonte: Autor

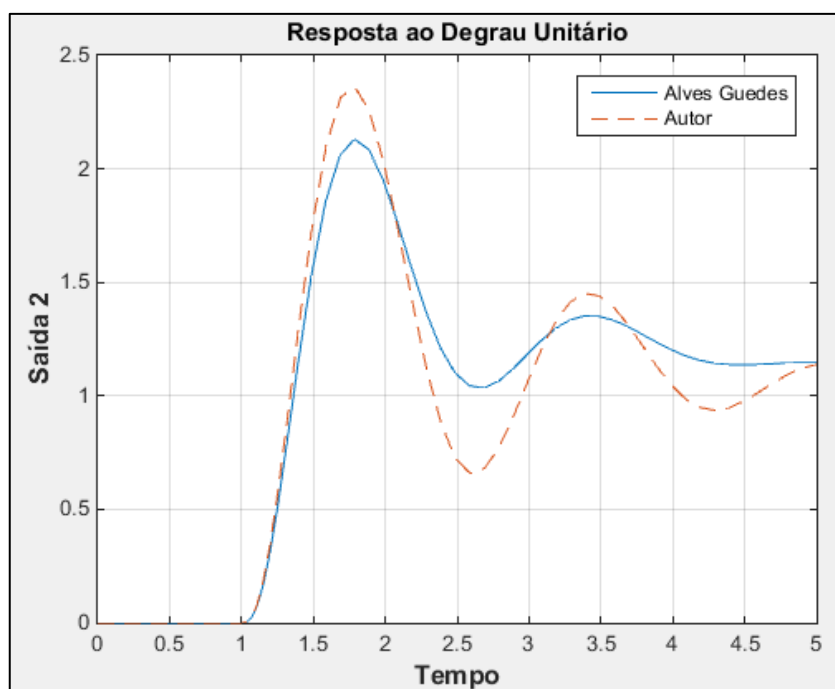


Figura 45 - Saída 2, Ajuste Grosso PI  
Fonte: Autor

Após o ajuste, percebe-se que os valores encontrados pelo autor possui uma característica de resposta mais rápida do que o Alves (1988) mas em compensação, os valores de overshoot também são mais elevados.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 46.44                   | 9.11                             | 0.48                       | 2.32                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.11                    | 8.04                             | 0.43                       | 3.3                               |
| <b>Autor</b>                        | 1.50                    | 24.42                            | 0.33                       | 3.9                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 252.73                  | 115.17                           | 0.21                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 3.51                    | 113.11                           | 0.21                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 3.42                    | 136.04                           | 0.21                       | 3.98                              |

Quadro 76 - Resultado: Ajuste Grosso PI

Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PI

Será iniciado o ajuste fino no sistema e para tal deve-se escolher o percurso para encontrar novos pontos que fazem parte do limite de estabilidade e que nos forneça melhores parâmetros. Para esse caso, deve-se adotar o sentido “1”.

|              | <b>KP1</b>  | <b>KP2</b>   |
|--------------|---|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = 2.4435 * 0.5$<br>$Kp1 = 1.22175$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 0.2808 * 0.5$<br>$Kp2 = 0.1404$ |

Quadro 77 - Ajuste Fino : PI

Fonte: Autor

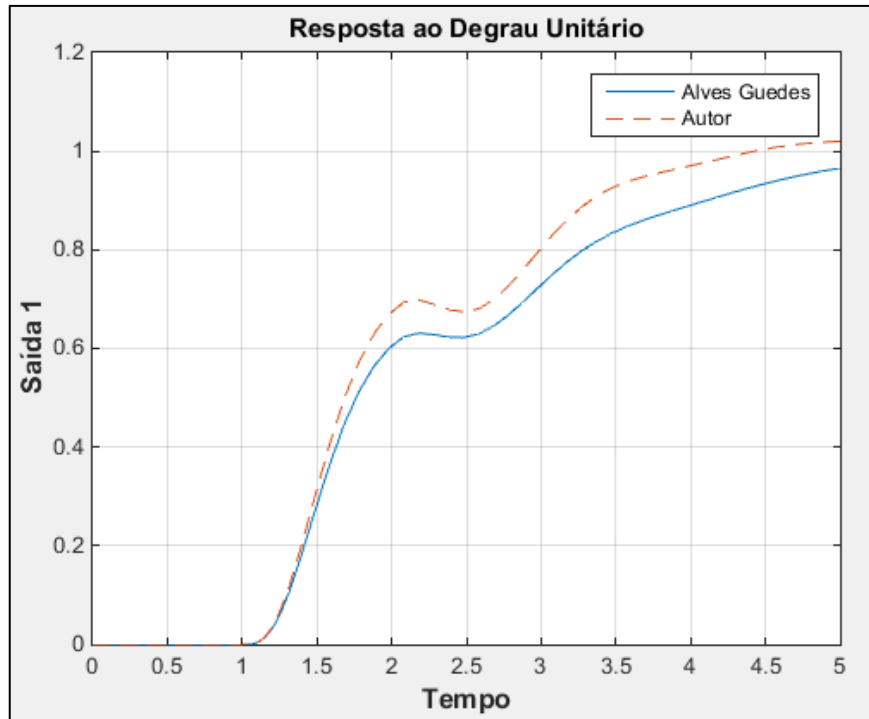


Figura 46 - Saída 1, Ajuste Fino PI  
 Fonte: Autor

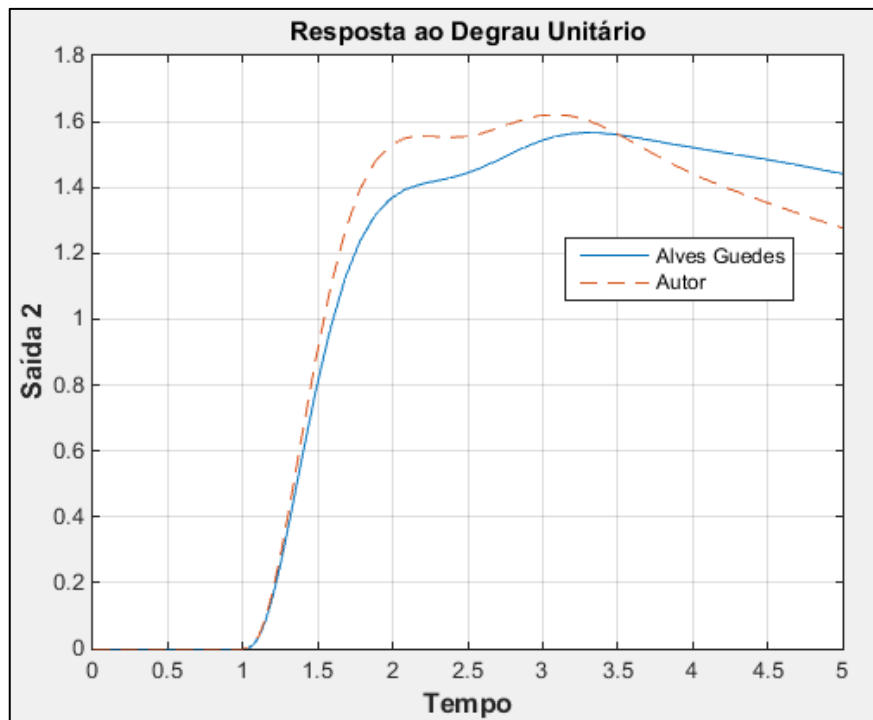


Figura 47 - Saída 2, Ajuste Fino PI  
 Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 144.74                  | Não há                           | 2.69                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 2.78                    | Não há                           | 2.43                       | 4.7                               |
| <b>Autor</b>                        | 2.03                    | 1.98                             | 2.11                       | 3.6                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 520.68                  | 48.07                            | 0.37                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 5.84                    | 56.62                            | 0.64                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 5.62                    | 62.15                            | 0.43                       | Não<br>determinado                |

Quadro 78 - Resultado: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

A saída 1 tornou-se muito lenta e a saída 2 correspondeu a expectativa de diminuição no valor de overshoot.

### **AJUSTE FINO PI**

Com base nos valores encontrados, será efetuado um novo ajuste fino para tentar melhorar ainda mais o desempenho do sistema. Motivado pelo resultado insatisfatório da primeira saída, é realizado a anulação do último ajuste fino feito no

controlador, e, atualiza agora apenas a segunda saída adotando o sentido de percurso equivalente ao número “3” do gráfico de ajuste fino proposto.

|              | <b>KP1</b>     | <b>KP2</b>   |
|--------------|----------------|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = 2.4435$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 0.1404 * 0.5$<br>$Kp2 = 0.0702$ |

Quadro 79 - Ajuste Fino : PI

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 166.17                  | Não há                           | 2.99                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.20                    | Não há                           | 1.69                       | 3.1                               |
| <b>Autor</b>                        | 1.05                    | 0.7                              | 1.57                       | 2.9                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 681.72                  | 59.05                            | 0.39                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 7.87                    | 92.44                            | 0.28                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 7.35                    | 102.56                           | 0.27                       | Não<br>determinado                |

Quadro 80 - Resultado: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

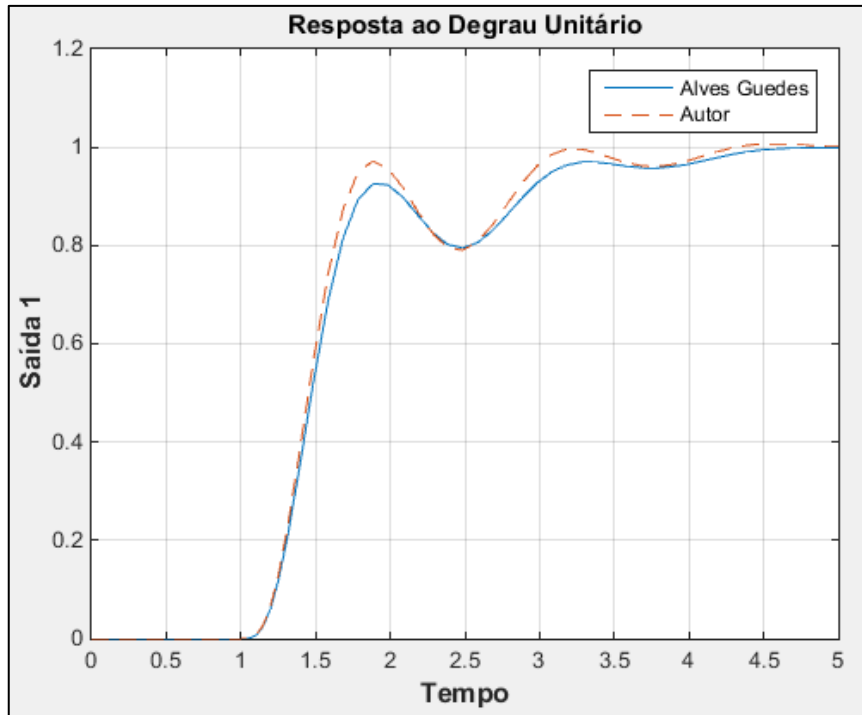


Figura 48 - Saída 1, Ajuste Fino PI  
Fonte: Autor

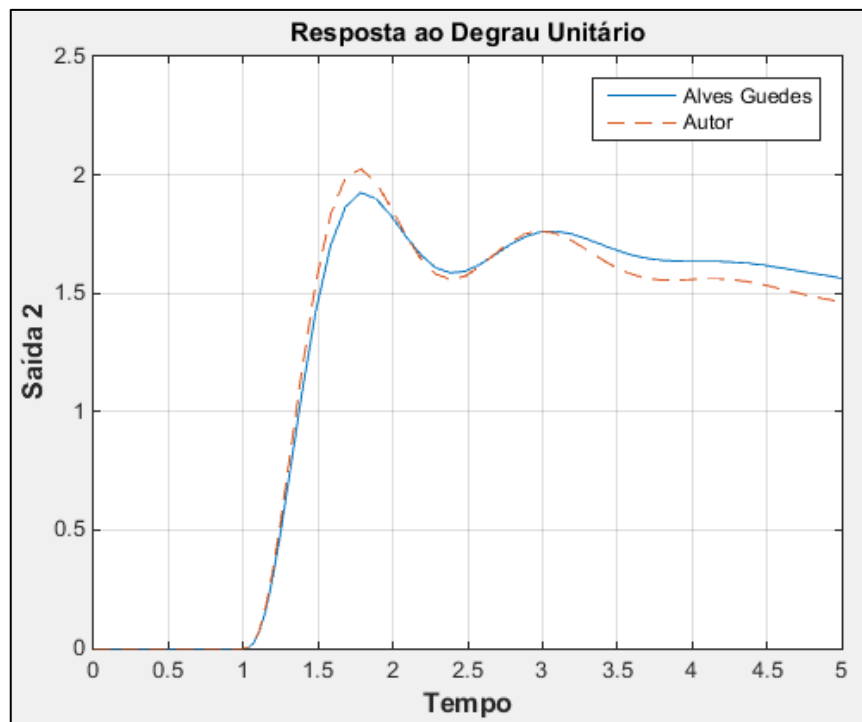


Figura 49 - Saída 2, Ajuste Fino PI  
Fonte: Autor

Ocorre nesse ajuste, justamente o efeito contrário do que era esperado. Em vez de diminuir o valor de overshoot da segunda saída, acaba que ocorre um aumento.

Portanto, será fixado o valor do primeiro ajuste fino realizado no controlador PI e dar sequência na metodologia, vale ressaltar que o ajuste fino é opcional e deve ser utilizado apenas quando ele agrega melhorias no sistema em questão.

### AJUSTE GROSSO PID

|            |   |
|------------|---|
| <b>Kp1</b> | $Kp1(PID) = 1.2 Kp1(PI)$ $Kp1(PID) = 1.2 * 1.22175$ $Kp1(PID) = 1.4661$       |
| <b>TI1</b> | $TI1 (PID) = 0.6 TI1(PI)$ $TI1 (PID) = 0.6 * 0.7650$ $TI1 (PID) = 0.459$      |
| <b>TD1</b> | $TD1 (PID) = 0.25 TI1 (PID)$ $TD1 (PID) = 0.25 * 0.459$ $TD1 (PID) = 0.11475$ |
| <b>Kp2</b> | $Kp2(PID) = 1.2 Kp2(PI)$ $Kp2(PID) = 1.2 * 0.1404$ $Kp2(PID) = 0.16848$       |
| <b>TI2</b> | $TI2 (PID) = 0.6 TI2(PI)$ $TI2 (PID) = 0.6 * 1.1050$ $TI2 (PID) = 0.663$      |
| <b>TD2</b> | $TD2 (PID) = 0.25 TI2 (PID)$ $TD2 (PID) = 0.25 * 0.663$ $TD2 (PID) = 0.16575$ |

Quadro 81 - Ajuste Grosso: PID

Fonte: Autor

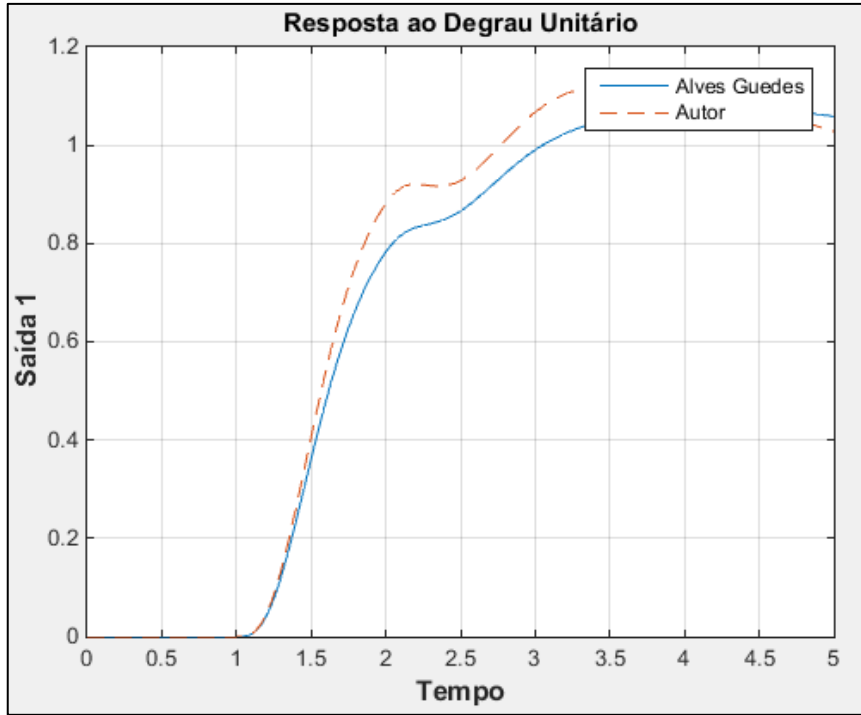


Figura 50 - Saída 1, Ajuste Grosso PID  
 Fonte: Autor

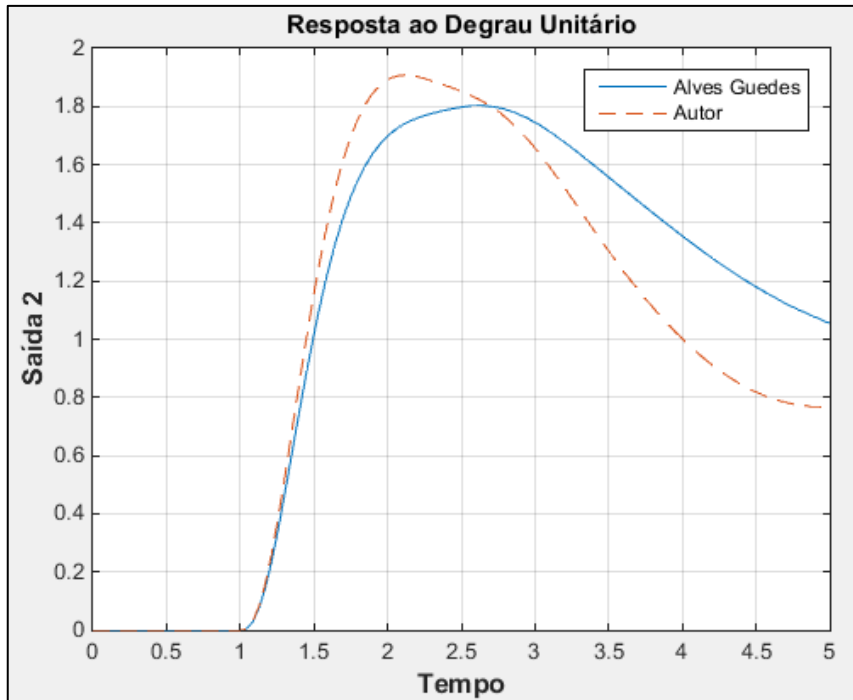


Figura 51 - Saída 2, Ajuste Grosso PID  
 Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 50.88                   | 3.03                             | 1.02                       | 1.5                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.66                    | 7.98                             | 1.52                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 1.68                    | 12.42                            | 1.20                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 300.64                  | 66.88                            | 0.27                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 5.44                    | 80.30                            | 0.33                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 4.74                    | 90.83                            | 0.26                       | Não<br>determinado                |

Quadro 82 - Resultado: Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

Ambas saídas apresentaram valores de overshoot acima de zero, por isso irá ser executado o ajuste adequado para tentar corrigir essa característica.

## AJUSTE FINO PID

Iremos adotar o sentido do percurso “1”, visando amenizar o valor de overshoot das duas saídas.

|              | <b>KP1</b>  | <b>KP2</b>   |
|--------------|---|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = 1.4661 * 0.5$<br>$Kp1 = 0.73305$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 0.16848 * 0.5$<br>$Kp2 = 0.08424$ |

Quadro 83 - Ajuste Fino : PID

Fonte: Autor

Com as medidas adotadas, percebe-se que o comportamento da segunda saída teve suas oscilações reduzidas, porém não eliminadas, enquanto a primeira saída não teve suas oscilações eliminadas como se tornou mais lenta também.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 145.20                  | Não há                           | 2.5                        | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 2.69                    | 1.14                             | 2.39                       | 4.15                              |
| <b>Autor</b>                        | 2.21                    | 6.68                             | 1.95                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 650.29                  | 62.83                            | 0.59                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 7.53                    | 77.75                            | 1.39                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 7.87                    | 86.65                            | 0.84                       | Não<br>determinado                |

Quadro 84 - Resultado: Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

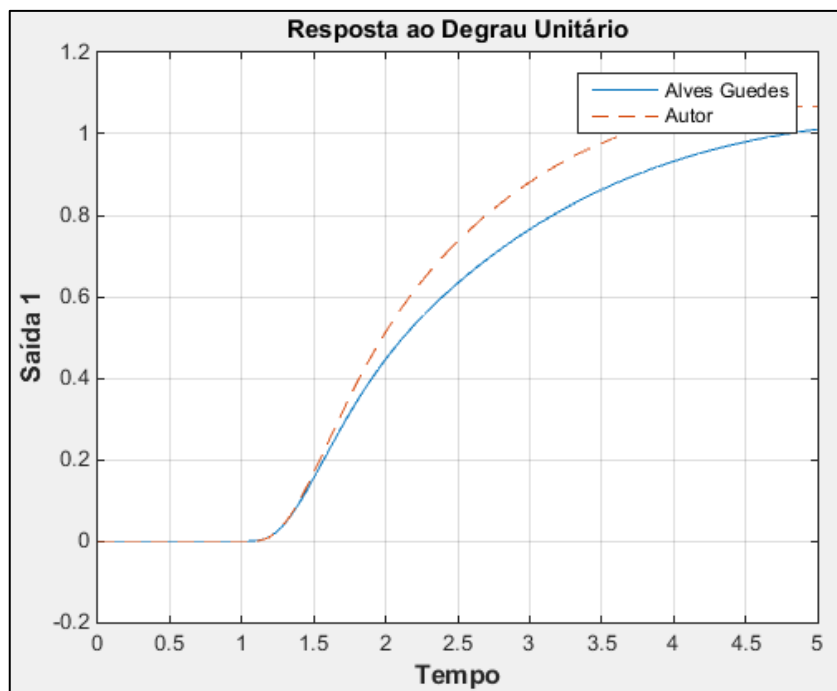


Figura 52 - Saída 1, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

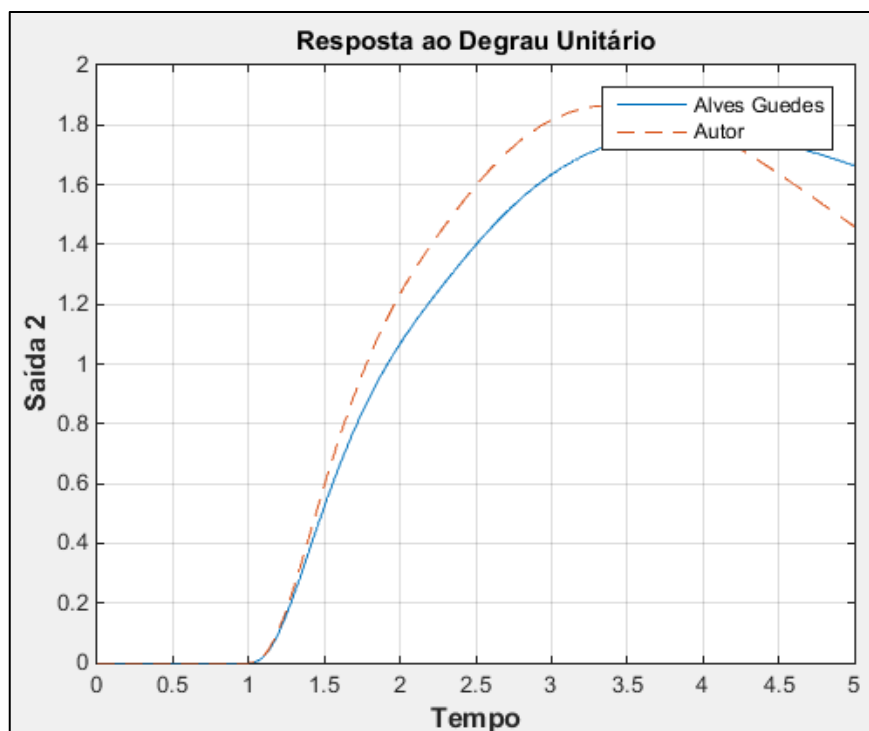


Figura 53 - Saída 2, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PID

Com os resultados obtidos, a próxima etapa é realizar o ajuste fino tentando melhorar a qualidade de ambas as saídas. Adotou-se agora o sentido do percurso “4”, onde deve-se voltar com o valor do ajuste grosso referente ao ganho do controlador proporcional da primeira saída, visto que, o seu último ajuste não teve o efeito desejado e por fim, diminuir o valor de  $Kp2$ .

|              | <b>KP1</b>     | <b>KP2</b>   |
|--------------|----------------|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = 1.4661$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 0.08424 * 0.5$<br>$Kp2 = 0.04212$ |

Quadro 85 - Ajuste Fino : PID

Fonte: Autor

Com esse ajuste conseguiu-se melhorar significativamente o tempo de resposta da primeira saída, antes não era possível determinar o tempo de estabilização, agora ela atinge o valor de referência em praticamente metade do valor do tempo de simulação. O overshoot também melhorou, ficando praticamente nulo. Já a segunda saída, não se obteve os resultados esperados, o overshoot continua aumentando.

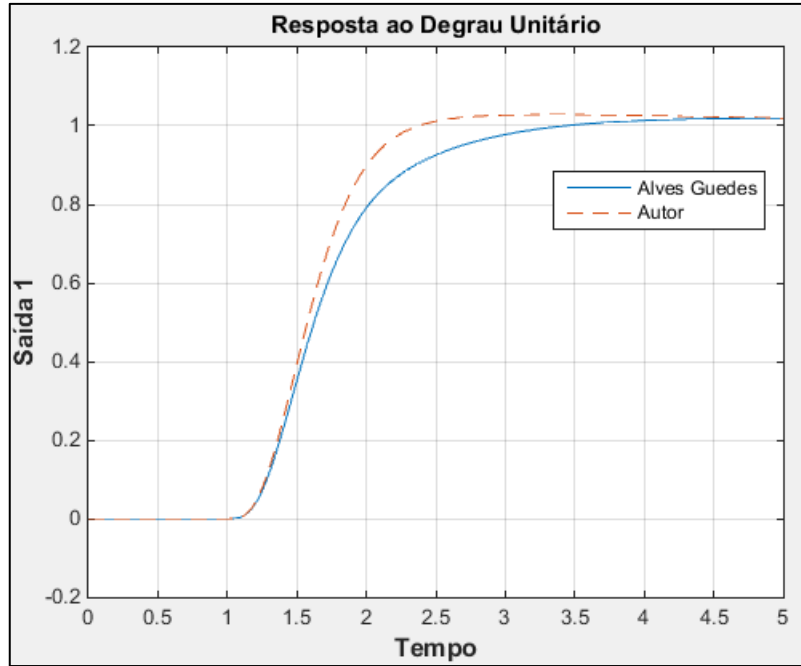


Figura 54 - Saída 1, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

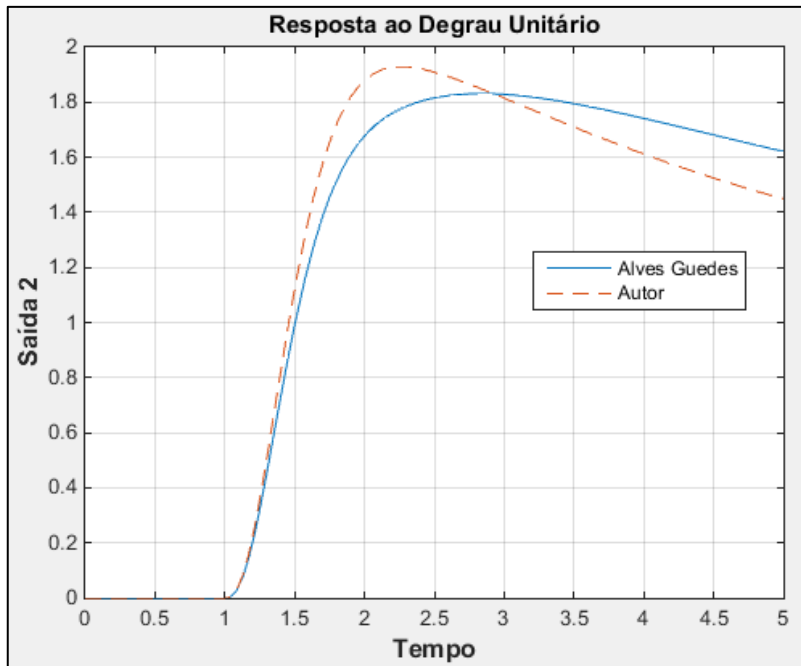


Figura 55 - Saída 2, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 54.32                   | 1.85                             | 1.32                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.20                    | 1.93                             | 1.19                       | 2.7                               |
| <b>Autor</b>                        | 1.06                    | 2.87                             | 0.76                       | 2.1                               |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 814.63                  | 76.69                            | 0.28                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 8.56                    | 83.14                            | 0.56                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 7.93                    | 92.95                            | 0.29                       | Não<br>determinado                |

Quadro 86 - Resultado: Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PID

Como o último ajuste fino realizado no processo não surtiu efeitos de melhoria na saída 2, deve-se descartar esses parâmetros e voltar com o valor anterior do processo de refinamento.

|              | <b>KP1</b>     | <b>KP2</b>      |
|--------------|----------------|-----------------|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = 1.4661$ | $Kp2 = 0.08424$ |

Quadro 87 - Ajuste Fino: PID

Fonte: Autor

É então encerrado o ajuste desse processo.

Esse processo em especial, o autor, Niederlinski, nos informa os parâmetros que ele encontrou quando foi efetuado o ajuste do deste processo, conforme pode-se observar:

**ITAE, Saída 1 = 43.33**

**ITAE, Saída 2 = 83.82**

**PO, Saída 1 = 31.92%**

**PO, Saída 2 = 119.28%**

**Tsubida, Saída 1 = 0.23**

**Tsubida, Saída 2 = 0.13**

**Testabilização, Saída 1 = 2.38**

**Testabilização, Saída 2 = 2.73**

Observando seus resultados e comparando com os que foram simulados conforme a metodologia discutida nesse trabalho, pode-se perceber que a proposta desenvolvida se mostra melhor em todas as instâncias na primeira saída e foi melhorado alguns parâmetros da segunda saída, sendo assim, para esse processo é possível afirmar que as técnicas utilizadas até o momento, são de fato eficazes em comparação com outras metodologias existentes e consolidadas.

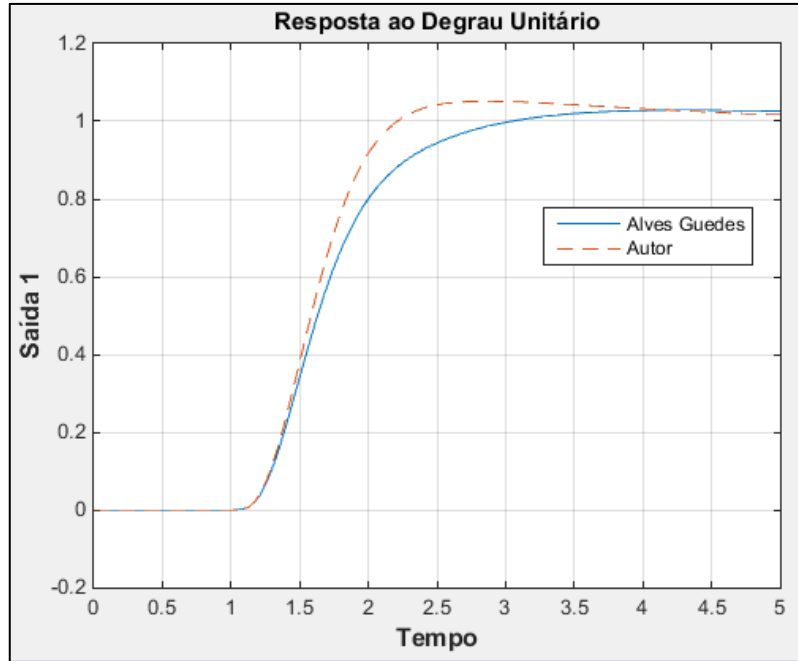


Figura 56 - Saída 1, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor.

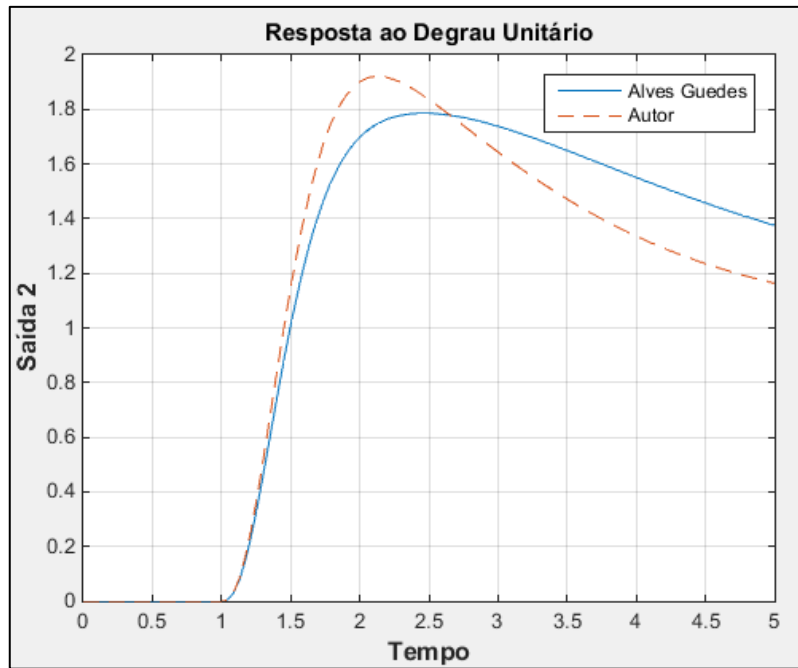


Figura 57 - Saída 2, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 57.16                   | 2.60                             | 1.2                        | 1.73                              |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1.24                    | 2.89                             | 1.01                       | 2.5                               |
| <b>Autor</b>                        | 1.16                    | 5.16                             | 0.68                       | 2.02                              |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 576.73                  | 72.64                            | 0.28                       | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 6.98                    | 78.59                            | 0.45                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 5.64                    | 92.13                            | 0.32                       | Não<br>determinado                |

Quadro 88 - Resultado: Ajuste Fino PID  
 Fonte: Autor.

#### 5.4.3. TERCEIRO PROCESSO

Dando sequência, irá ser executado o ajuste do penúltimo processo que foi abordado nesse trabalho. Os parâmetros de ganho crítico já foram coletados e serão novamente conotados:

|                                 | <b>Kp1máx</b> | <b>Tosc1</b> | <b>Kp2máx</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | 600           | 1.16         | 700           | 0.84         |
| <b>Autor</b>                    | 600           | 1.21         | 700           | 0.84         |

Quadro 89 - Pontos A e B, Terceiro Processo

Fonte: Autor.

|                             | <b>Ponto C</b> |            | <b>Ponto D</b> |            |
|-----------------------------|----------------|------------|----------------|------------|
|                             | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> |
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | 300            | 600        | 600            | 350        |
| <b>Autor</b>                | 300            | 600        | 600            | 350        |

Quadro 90 - Pontos C e D, Terceiro Processo

Fonte: Autor

Após a determinação dos pontos que compõe o limite da região de estabilidade, deve-se escolher o ponto onde o erro ITAE seja o menor possível.

|                | <b>Kp1</b>  | <b>Kp2</b>  |
|----------------|---|---|
| <b>Ponto 1</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto C})$ $Kp1 = 0.6 * 300$ $Kp1 = 180$           | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto C})$ $Kp2 = 0.6 * 600$ $Kp2 = 360$           |
| <b>Ponto 2</b> | $Kp1 = \frac{Kp1(C) + Kp1(D)}{2}$ $Kp1 = \frac{180 + 360}{2}$ $Kp1 = 270$ | $Kp2 = \frac{Kp2(C) + Kp2(D)}{2}$ $Kp2 = \frac{360 + 210}{2}$ $Kp2 = 285$ |
| <b>Ponto 3</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto D})$ $Kp1 = 0.6 * 600$ $Kp1 = 360$           | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto D})$ $Kp2 = 0.6 * 350$ $Kp2 = 210$           |

Quadro 91 - Determinação dos pontos 1,2 e 3.

Fonte: Autor

|                | ITAE SAÍDA 1 | ITAE SAÍDA 2 |
|----------------|--------------|--------------|
| <b>PONTO 1</b> | 14.22        | 15.58        |
| <b>PONTO 2</b> | 12.33        | 19.80        |
| <b>PONTO 3</b> | 12.57        | 24.61        |

Quadro 92 - Determinação ITAE  
 Fonte: Autor

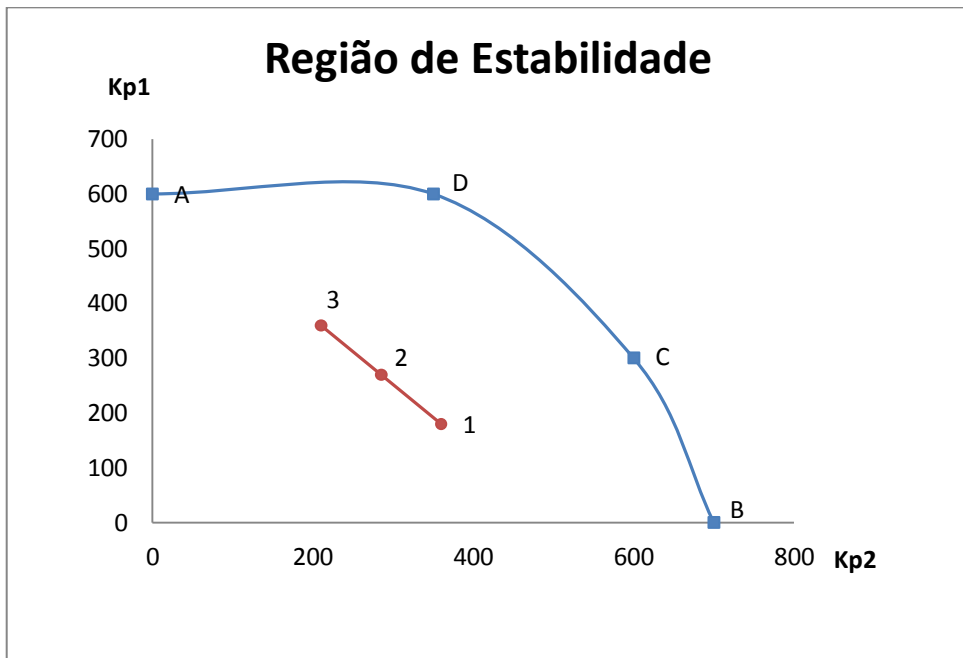


Figura 58 - Região de Estabilidade, Dados do Alves e Autor.  
 Fonte: Autor

|                | ITAE PONDERADO  |
|----------------|---|
| <b>PONTO 1</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{14.22 + 15.58}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 14.9$ |

|                |   |
|----------------|---|
| <b>PONTO 2</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{12.33 + 19.80}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 16.065$ |
| <b>PONTO 3</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\textit{peso1 ITAE1} + \textit{peso2 ITAE2}}{\textit{peso1} + \textit{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{12.57 + 24.61}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 18.59$  |

Quadro 93 - Determinação do ITAE ponderado

Fonte: Autor

O ponto escolhido como base para os próximos passos de ajuste nos controladores foi o ponto 1, pois ele apresenta o menor valor de ITAE ponderado entre os demais pontos.

### AJUSTE GROSSO PROPORCIONAL

Dando sequência, é iniciado os ajustes no segundo processo, onde será identificado o ponto que representa os parâmetros do ajuste grosso para o controle proporcional.

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>ITAE ponderado</b> |
|---------------------------------|------------|------------|-----------------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | 180        | 360        | 3628                  |
| <b>Autor</b>                    | 180        | 360        | 14.9                  |

Quadro 94 - Ajuste Grosso : Proporcional

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2275.20                 | 17.9                             | 0.28                       | 21.24                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 14.22                   | 45.96                            | 1.10                       | 11.20                             |
| <b>Autor</b>                        | 14.22                   | 45.96                            | 1.10                       | 11.20                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 4980.23                 | 136.82                           | 0.14                       | 25.92                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 15.58                   | 120.89                           | 0.15                       | 14.12                             |
| <b>Autor</b>                        | 15.58                   | 120.89                           | 0.15                       | 14.12                             |

Quadro 95 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional

Fonte: Autor

### **AJUSTE FINO PROPORCIONAL**

O sentido que deverá ser adotado é o número “1”, diminuindo o valor do ganho em ambos controladores proporcional. Esse ajuste foi executado duas vezes, pois o grau de oscilação estava muito elevado.

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0,5^2$<br>$Kp1 = 180 * 0,5^2$<br>$Kp1 = 45$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0,5^2$<br>$Kp2 = 360 * 0,5^2$<br>$Kp2 = 90$ |
|--------------|---|---|

Quadro 96 - Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2641.35                 | 11.38                            | 0.6                        | 15.24                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 27.32                   | 23.60                            | 2.46                       | 15.15                             |
| <b>Autor</b>                        | 27.32                   | 23.60                            | 2.46                       | 15.15                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1481.43                 | 112.66                           | 0.32                       | 12.00                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 14.70                   | 106.12                           | 0.42                       | 9.5                               |
| <b>Autor</b>                        | 14.70                   | 106.12                           | 0.42                       | 9.5                               |

Quadro 97 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

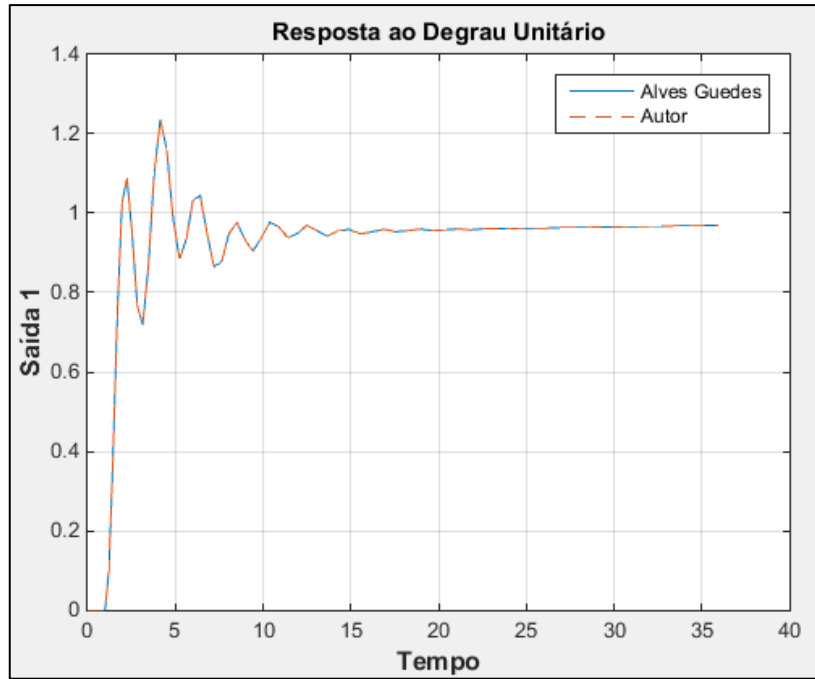


Figura 59 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

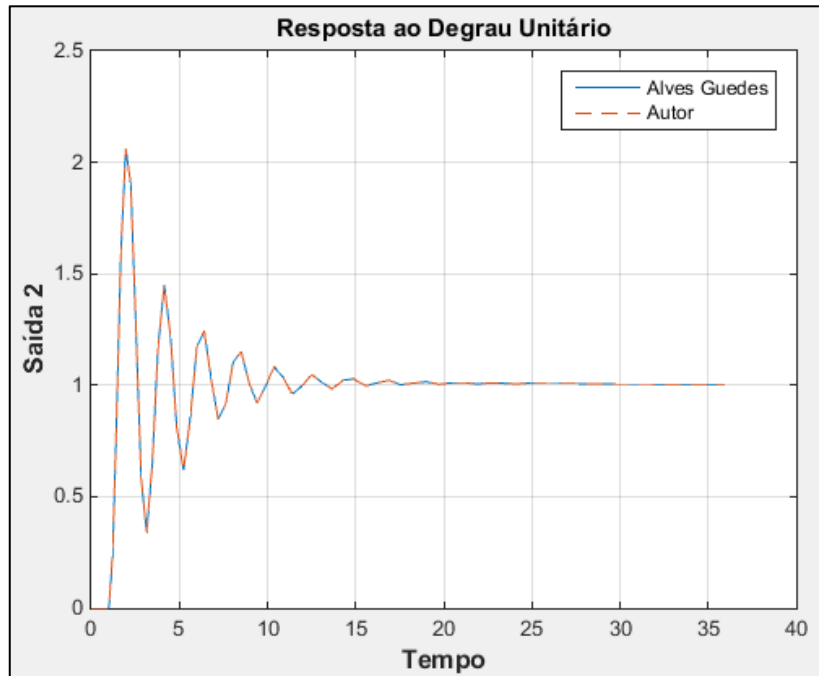


Figura 60 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

Como previsto, mudando a região de estabilidade como determina a metodologia, as amplitudes das oscilações são diminuídas o que mostra que o ajuste feito nos controladores estão funcionando, mas deve ater-se ao fato que outro parâmetro também é alterado, que é o tempo de estabilização.

Novamente é sempre bom ressaltar que a metodologia proposta nesse trabalho atua sobre a percepção do usuário que está realizando os ajustes. Então fica a critério do usuário quando deve dar continuidade ou cessar o desenvolvimento no ajuste fino do processo.

### AJUSTE FINO PROPORCIONAL

Como a saída 1 está muito próximo do valor de referência e com poucas oscilações, optou-se pela mudança apenas da saída 2 que demonstra ainda altos níveis de oscilação. Deve-se adotar o sentido do percurso número “3”.

|              |            |  |
|--------------|------------|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = 45$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0,5$<br>$Kp2 = 90 * 0,5$<br>$Kp2 = 45$ |
|--------------|------------|--|

Quadro 98 - Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

O ajuste realizado não surtiu o efeito esperado. Os índices ficaram piores.

Para dar sequência, deve-se ignorar esse último ajuste fino e utilizar os parâmetros que antecederam ele.

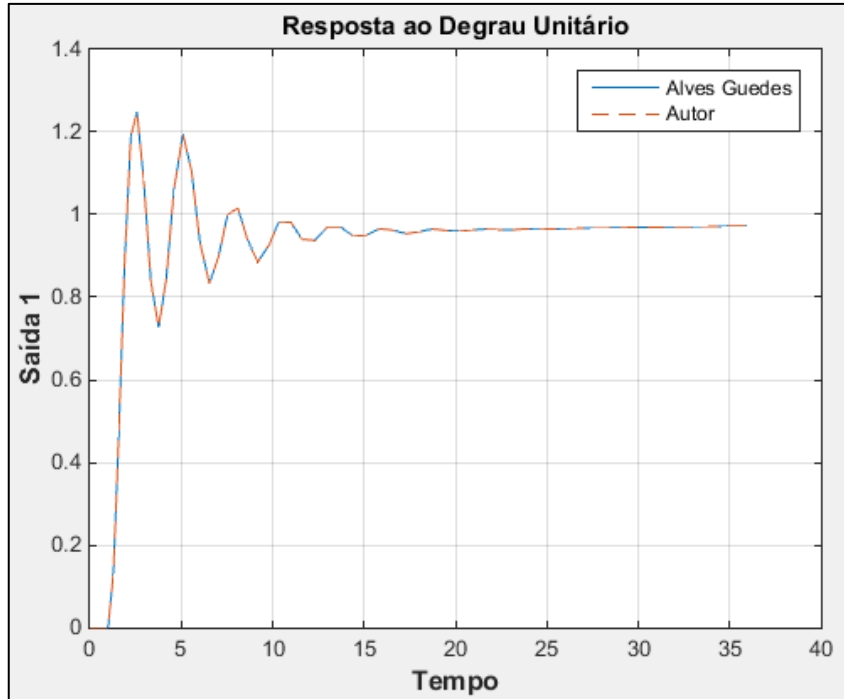


Figura 61 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

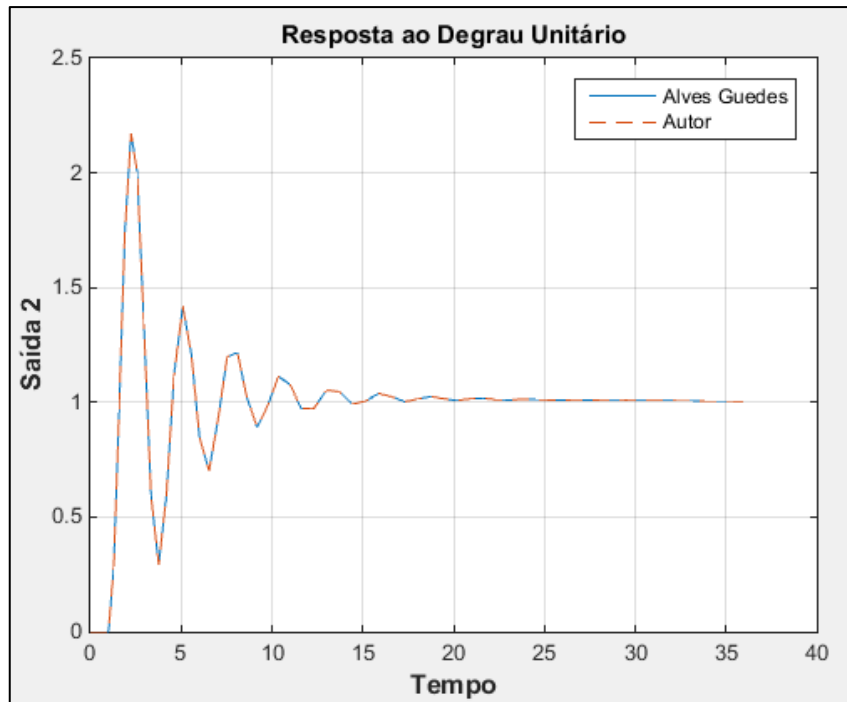


Figura 62 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2477.65                 | 27.39                            | 0.66                       | 14.28                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 25.84                   | 24.86                            | 0.57                       | 12.5                              |
| <b>Autor</b>                        | 25.84                   | 24.86                            | 0.57                       | 12.5                              |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1845.77                 | 122.07                           | 0.38                       | 15.12                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 19.64                   | 117.17                           | 0.29                       | 13.00                             |
| <b>Autor</b>                        | 19.64                   | 117.17                           | 0.29                       | 13.00                             |

Quadro 99 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

## AJUSTE GROSSO PI

|            |  |
|------------|--|
| <b>Kp1</b> | $Kp1 (PI) = 0.9 Kp1$ $Kp1 (PI) = 0.9 * 45$ $Kp1 (PI) = 40.5$         |
| <b>TI1</b> | $TI1(PI) = 0.85 T_{osc1}$ $TI1(PI) = 0.85 * 1.21$ $TI1(PI) = 1.0285$ |
| <b>Kp2</b> | $Kp2 (PI) = 0.9 Kp2$ $Kp2 (PI) = 0.9 * 90$ $Kp2 (PI) = 81$           |
| <b>TI2</b> | $TI2(PI) = 0.85 T_{osc2}$ $TI2(PI) = 0.85 * 0.84$ $TI2(PI) = 0.714$  |

Quadro 100 - Ajuste Grosso: PI  
Fonte: Autor

Com este ajuste verificou-se que o que sistema se instabilizou.

## AJUSTE FINO PI

O trabalho proposto está ciente que essas situações podem vir a ocorrer em diversos processos.

O próximo passo que deve ser tomado, seguindo a metodologia descrita, é de alterar os parâmetros críticos do sistema que são o tempo de integração e

derivação. Para a atual situação deve-se dobrar o valor de TI e verificar os resultados.

O procedimento surtiu efeito, embora as saídas se encontrem com um grau muito elevado de oscilação.

Pode-se ainda, executar novamente o ajuste no tempo de integração e observar os resultados.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 3080.87                 | 21.13                            | 0.58                       | 24.60                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 19.15                   | 46.47                            | 2.38                       | 17.60                             |
| <b>Autor</b>                        | 18.97                   | 45.94                            | 2.37                       | 17.25                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 7969.91                 | 130.31                           | 0.32                       | 34.56                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 50.00                   | 124.62                           | 0.25                       | 24.20                             |
| <b>Autor</b>                        | 49.40                   | 124.30                           | 0.24                       | 23.41                             |

Quadro 101 - Resultado: Ajuste Grosso PI

Fonte: Autor

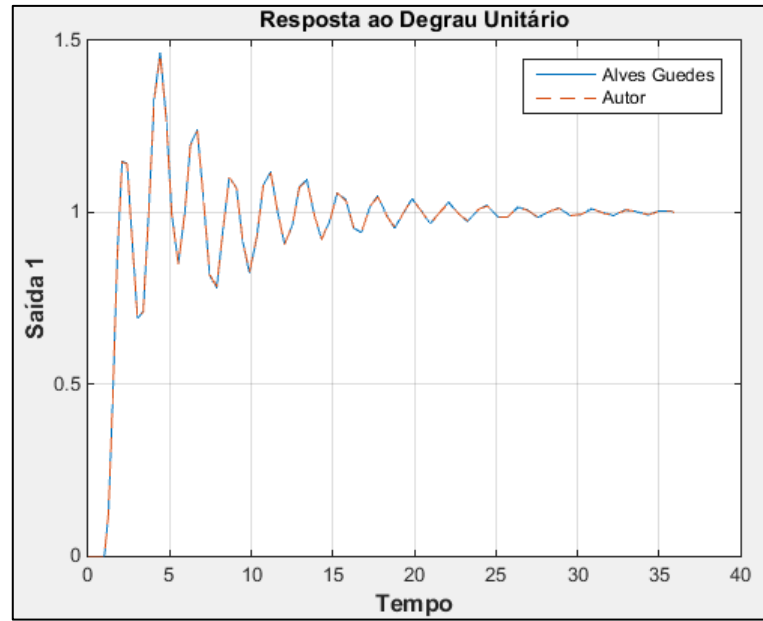


Figura 63 - Saída 1, Ajuste Grosso PI  
Fonte: Autor

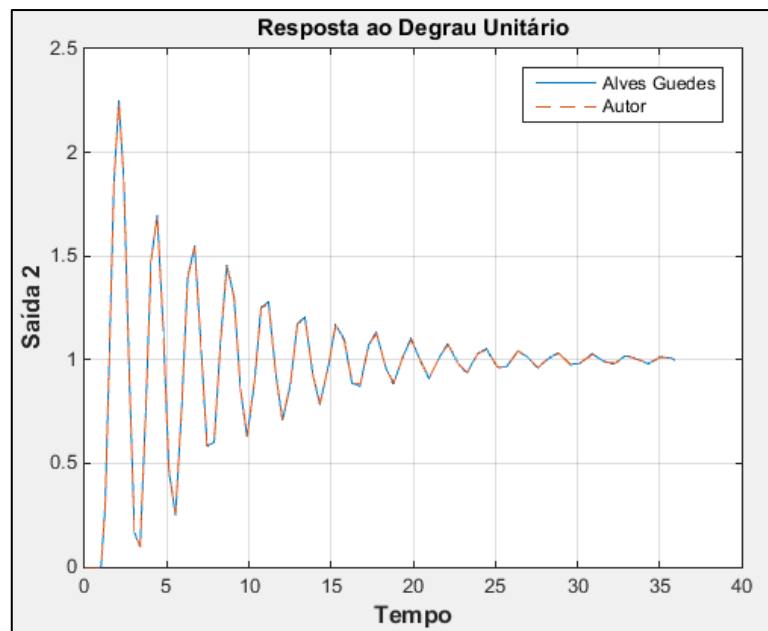


Figura 64 - Saída 2, Ajuste Grosso PI  
Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PI

Como ambas saídas apresentam oscilações, deve-se adotar o sentido de percurso igual a “1”. Foi efetuado três ajustes consecutivos com esse mesmo sentido, visto que, a cada ajuste realizado o parâmetro de sobressinal reagia de forma bem tímida, com mudanças de 1 a 2% do valor de overshoot.

|              |   |  |
|--------------|---|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0,5^3$<br>$Kp1 = 40.5 * 0,5^3$<br>$Kp1 = 5.065$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0,5^3$<br>$Kp2 = 81 * 0,5^3$<br>$Kp2 = 10.125$ |
|--------------|---|--|

Quadro 102 - Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

Com o ajuste realizado, esperando uma melhora na oscilações das saídas, notou-se que o tempo de estabilização também aumentou, fazendo com que o sistema demore mais para atingir o valor de referência. Então a partir desse ponto ficou definido a sucessão da última etapa do ajuste grosso para esse processo.

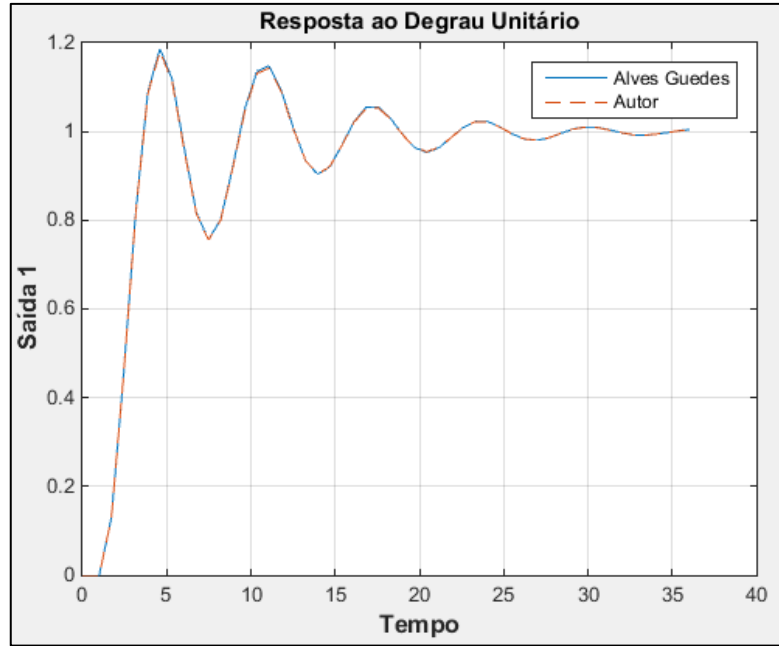


Figura 65 - Saída 1, Ajuste Fino PI  
 Fonte: Autor

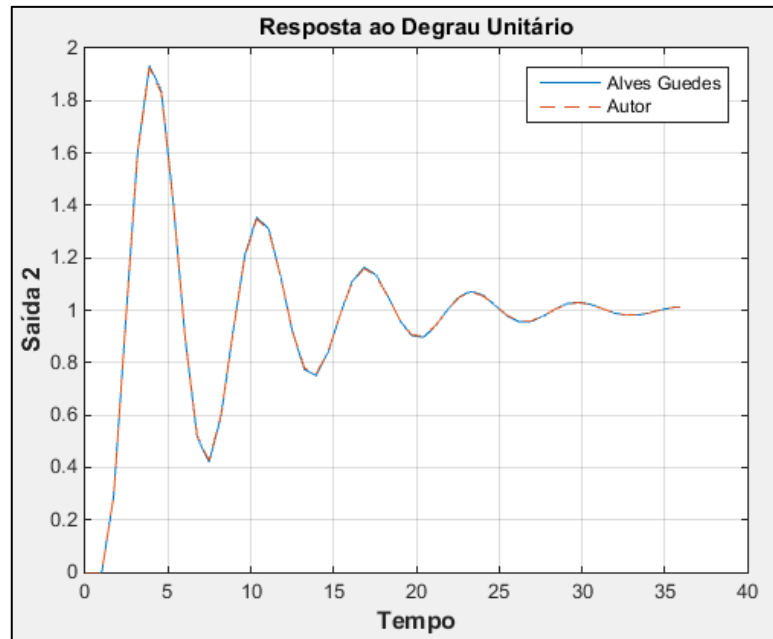


Figura 66 - Saída 2, Ajuste Fino PI  
 Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2059.29                 | 19.77                            | 1.68                       | 19.68                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 22.16                   | 18.64                            | 2.15                       | 17.51                             |
| <b>Autor</b>                        | 21.68                   | 18.10                            | 2.15                       | 17.50                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 5114.59                 | 96.80                            | 0.96                       | 25.92                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 53.11                   | 93.35                            | 0.72                       | 24.00                             |
| <b>Autor</b>                        | 51.90                   | 92.69                            | 0.72                       | 23.92                             |

Quadro 103 - Resultado: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

### AJUSTE GROSSO PID

|            |   |
|------------|---|
| <b>Kp1</b> | $Kp1(PID) = 1.2 Kp1(PI)$ $Kp1(PID) = 1.2 * 5.065$ $Kp1(PID) = 6.078$          |
| <b>TI1</b> | $TI1 (PID) = 0.6 TI1(PI)$ $TI1 (PID) = 0.6 * 4.114$ $TI1 (PID) = 2.4684$      |
| <b>TD1</b> | $TD1 (PID) = 0.25 TI1 (PID)$ $TD1 (PID) = 0.25 * 2.4684$ $TD1 (PID) = 0.6171$ |
| <b>Kp2</b> | $Kp2(PID) = 1.2 Kp2(PI)$ $Kp2(PID) = 1.2 * 10.125$ $Kp2(PID) = 12.15$         |
| <b>TI2</b> | $TI2 (PID) = 0.6 TI2(PI)$ $TI2 (PID) = 0.6 * 2.856$ $TI2 (PID) = 1.7136$      |
| <b>TD2</b> | $TD2 (PID) = 0.25 TI2 (PID)$ $TD2 (PID) = 0.25 * 1.7136$ $TD2 (PID) = 0.4284$ |

Quadro 104 - Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

Esse ajuste se demonstrou muito eficaz, pois ele eliminou diversas oscilações em ambas saídas, fez com que o tempo de estabilização diminuísse e o erro também foi reduzido.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 636.10                  | 5.97                             | 1.84                       | 10.92                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 9.40                    | 11.22                            | 1.49                       | 12.30                             |
| <b>Autor</b>                        | 9.43                    | 10.99                            | 1.49                       | 12.13                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1397.43                 | 66.32                            | 0.86                       | 13.32                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 16.72                   | 76.45                            | 0.59                       | 11.10                             |
| <b>Autor</b>                        | 16.75                   | 76.24                            | 0.58                       | 11.00                             |

Quadro 105 - Resultado: Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

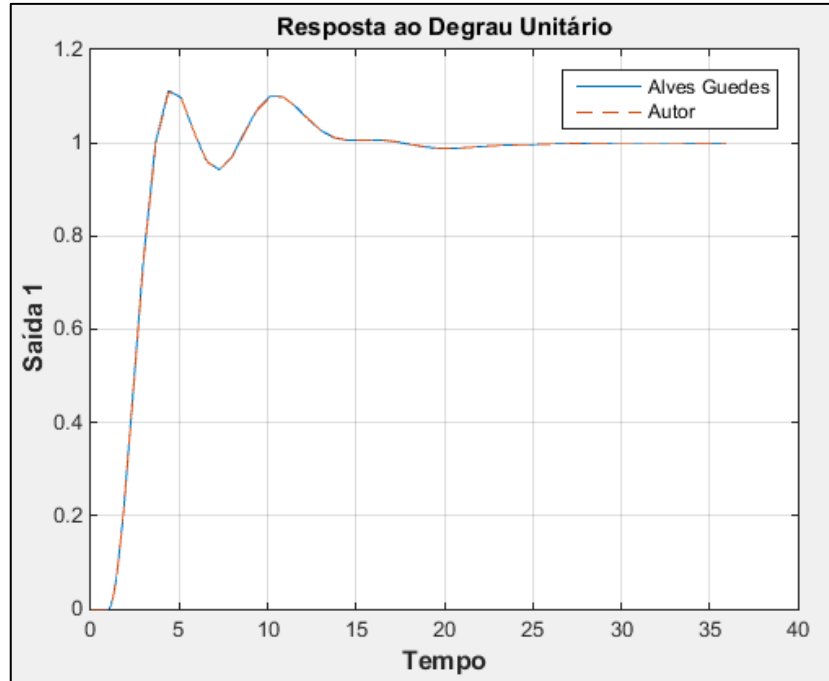


Figura 67 - Saída 1, Ajuste Grosso PID  
Fonte: Autor

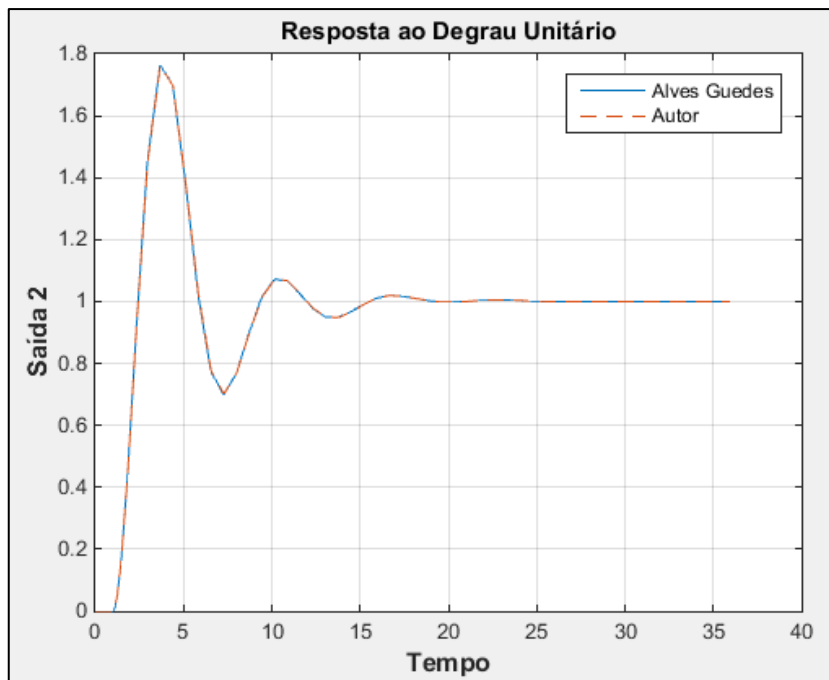


Figura 68 - Saída 2, Ajuste Grosso PID  
Fonte: Autor

## AJUSTE FINO PID

Embora o ajuste grosso PID tenha se demonstrado muito efetivo, ainda falta corrigir o nível de oscilações das saídas 1 e 2. Para isso será adotado o sentido de percurso “1”, onde deve-se diminuir o ganho dos controladores P.

|              | <b>KP1</b>   | <b>KP2</b>   |
|--------------|--|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = 6.078 * 0.5$<br>$Kp1 = 3.039$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 12.15 * 0.5$<br>$Kp2 = 6.075$ |

Quadro 106 - Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

Com esse ajuste fino, conforme poderá ser visto a seguir, não obteve os resultados esperados. O overshoot aumentou e as características corrigidas no ajuste grosso PID voltaram a aparecer. Então deve-se ignorar esse ajuste e finalizar as etapas de refinamento desse processo.

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1857.98                 | 14.15                            | 2.42                       | 17.88                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 22.05                   | 19.63                            | 1.89                       | 16.00                             |
| <b>Autor</b>                        | 21.95                   | 19.33                            | 1.88                       | 15.95                             |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 4511.34                 | 71.96                            | 1.30                       | 22.80                             |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 51.90                   | 83.58                            | 1.17                       | 23.53                             |
| <b>Autor</b>                        | 51.39                   | 83.34                            | 1.17                       | 23.48                             |

Quadro 107 - Resultado: Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

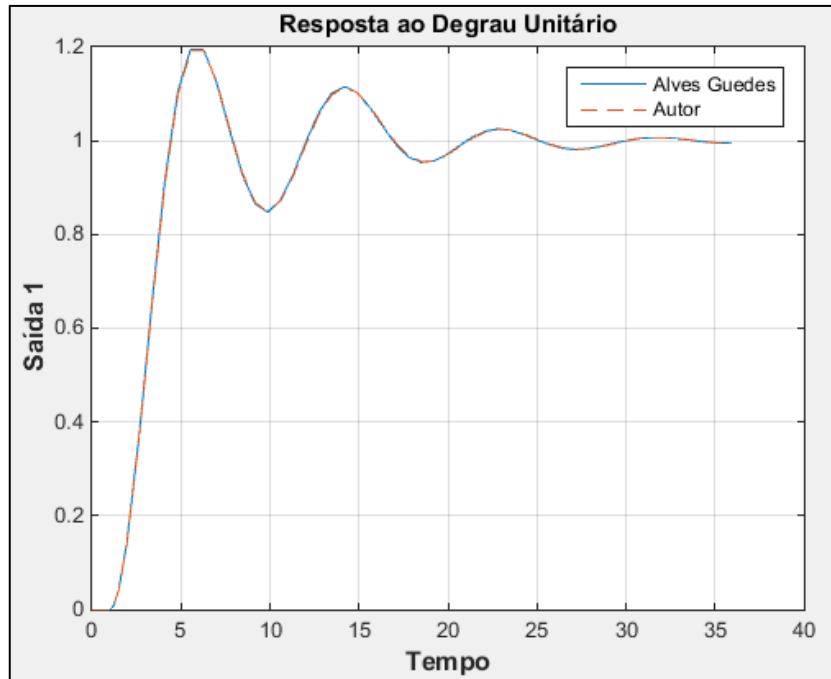


Figura 69 - Saída 1, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

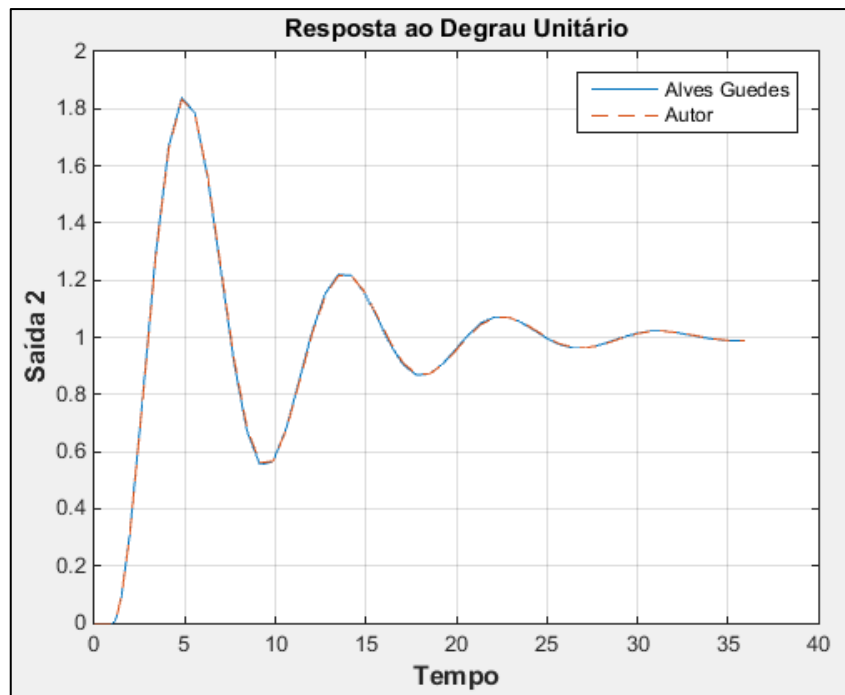


Figura 70 - Saída 2, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

#### 5.4.4. QUARTO PROCESSO

Será efetuado o ajuste do último processo desse trabalho, encerrando assim, com a metodologia proposta aplicado em distintos sistemas de duas entradas e duas saídas. Os parâmetros de ganho crítico já foram coletados e serão novamente demonstrados:

|                                 | <b>Kp1máx</b> | <b>Tosc1</b> | <b>Kp2máx</b> | <b>Tosc2</b> |
|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
| <b>Alves Guedes<br/>XT 2002</b> | -5            | 416          | 1450          | 17           |
| <b>Autor</b>                    | -5            | 360          | 1450          | 17.68        |

Quadro 108 - Pontos A e B, Quarto Processo

Fonte: Autor

|                             | <b>Ponto C</b> |            | <b>Ponto D</b> |            |
|-----------------------------|----------------|------------|----------------|------------|
|                             | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> | <b>Kp1</b>     | <b>Kp2</b> |
| <b>Alves Guedes XT 2002</b> | -2.5           | 1450       | -6             | 725        |
| <b>Autor</b>                | -2.5           | 1450       | -6             | 725        |

Quadro 109 - Pontos C e D, Quarto Processo

Fonte: Autor

Após a determinação os pontos que compõe o limite da região de estabilidade, deve-se escolher o ponto onde o erro ITAE seja o menor possível.

|                | <b>Kp1</b>  | <b>Kp2</b>   |
|----------------|---|--|
| <b>Ponto 1</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto C})$ $Kp1 = 0.6 * -2.5$ $Kp1 = -1.5$ | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto C})$ $Kp2 = 0.6 * 1450$ $Kp2 = 870$ |
| <b>Ponto 2</b> | $Kp1 = \frac{Kp1(C) + Kp1(D)}{2}$ $Kp1 = \frac{-1.5 - 3.60}{2}$   | $Kp2 = \frac{Kp2(C) + Kp2(D)}{2}$ $Kp2 = \frac{870 + 435}{2}$    |

|                |   |   |
|----------------|---|---|
|                | $Kp1 = -2.55$   | $Kp2 = 652.5$   |
| <b>Ponto 3</b> | $Kp1 = 0.6 * Kp1(\text{ponto D})$<br>$Kp1 = 0.6 * -6$<br>$Kp1 = -3.6$ | $Kp2 = 0.6 * Kp2(\text{ponto D})$<br>$Kp2 = 0.6 * 725$<br>$Kp2 = 435$ |

Quadro 110 - Determinação dos pontos 1,2 e 3.

Fonte: Autor

|                | ITAE SAÍDA 1 | ITAE SAÍDA 2 |
|----------------|--------------|--------------|
| <b>PONTO 1</b> | 241022       | 1016.93      |
| <b>PONTO 2</b> | 310294       | 938.41       |
| <b>PONTO 3</b> | 446114       | 896          |

Quadro 111 - Determinação ITAE.

Fonte: Autor

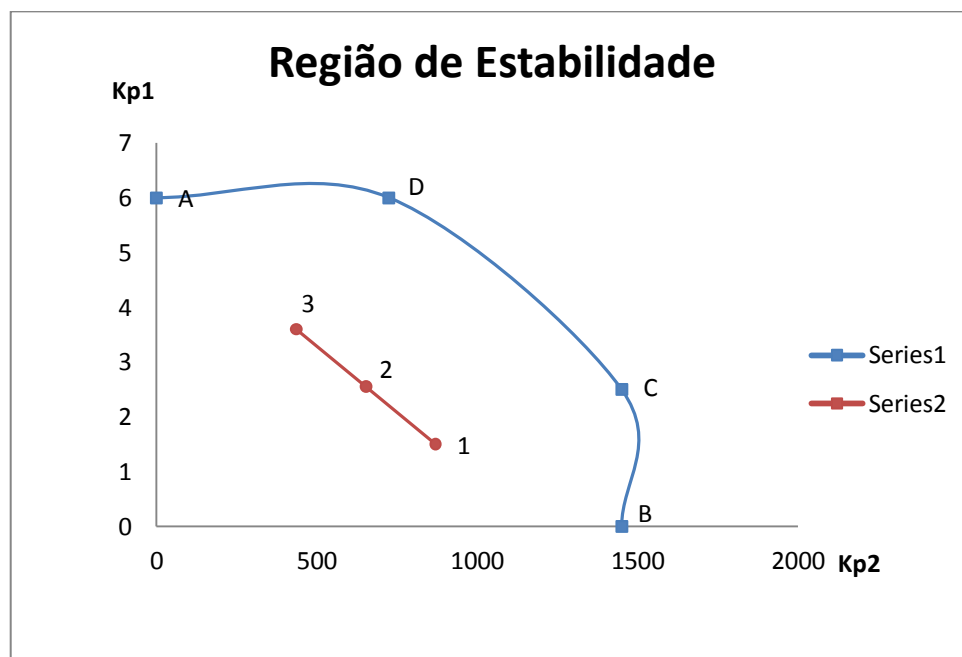


Figura 71 - Região de Estabilidade, Dados do Alves (1988) e Autor.

Fonte: Autor

|                | <b>ITAE PONDERADO</b>  |
|----------------|--|
| <b>PONTO 1</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{241022 + 1016.93}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 121019.465$ |
| <b>PONTO 2</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{310294 + 938.41}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 155616.205$  |
| <b>PONTO 3</b> | $ITAE \text{ ponderado} = \frac{\text{peso1 } ITAE1 + \text{peso2 } ITAE2}{\text{peso1} + \text{peso2}}$ $ITAE \text{ ponderado} = \frac{446114 + 896}{1 + 1}$ $ITAE \text{ ponderado} = 223505$         |

Quadro 112 - Determinação do ITAE ponderado.

Fonte: Autor

O ponto escolhido como base para os próximos passos de ajuste nos controladores foi, novamente, o ponto 1, pois ele apresenta o menor valor de índice ITAE ponderado entre os demais pontos.

## AJUSTE GROSSO PROPORCIONAL

Realiza agora o ajuste no último processo, iniciando com o ajuste grosso obtém-se:

|                                 | <b>Kp1</b> | <b>Kp2</b> | <b>ITAE ponderado</b> |
|---------------------------------|------------|------------|-----------------------|
| <b>Alves Guedes XT<br/>2002</b> | -1.5       | 870        | 12300000              |
| <b>Autor</b>                    | -1.5       | 870        | 121019.465            |

Quadro 113 - Ajuste Grosso : Proporcional

Fonte: Autor

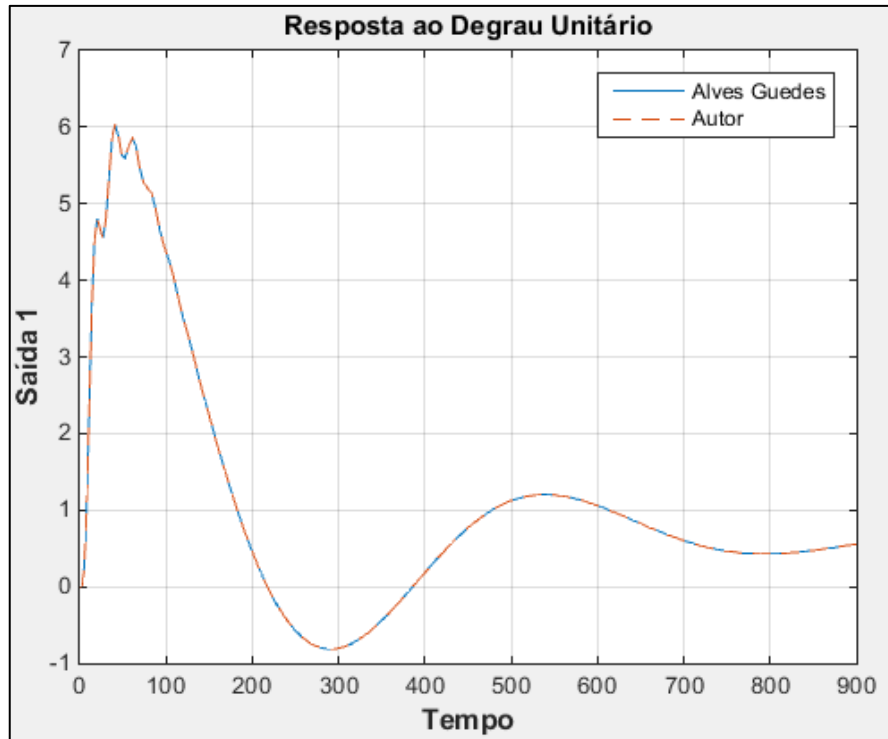


Figura 72 - Saída 1, Ajuste Grosso Proporcional  
Fonte: Autor

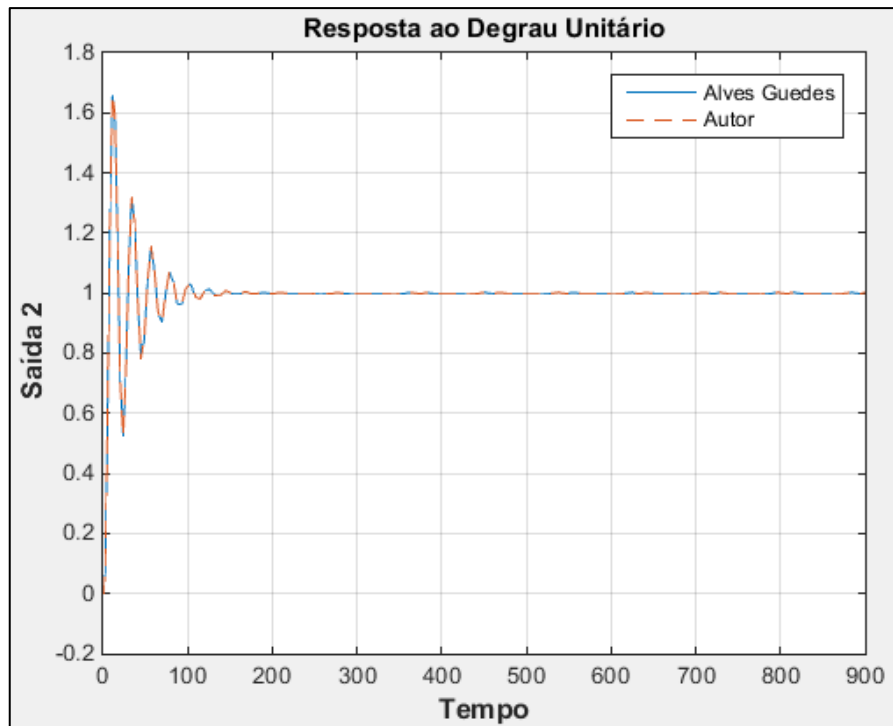


Figura 73 - Saída 2, Ajuste Grosso Proporcional  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 24116400                | 406.09                           | 4                          | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 241022                  | 503.57                           | 1.75                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 241022                  | 503.57                           | 1.75                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 362000                  | 86.17                            | 4                          | 224                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 1016.93                 | 65.55                            | 4.11                       | 81                                |
| <b>Autor</b>                        | 1016.93                 | 65.55                            | 4.11                       | 81                                |

Quadro 114 - Resultado: Ajuste Grosso Proporcional

Fonte: Autor

**AJUSTE FINO PROPORCIONAL**

|              | <b>KP1</b>  | <b>KP2</b>   |
|--------------|---|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = -1.5 * 0.5$<br>$Kp1 = -0.75$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 870 * 0,5$<br>$Kp2 = 435$ |

Quadro 115 - Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

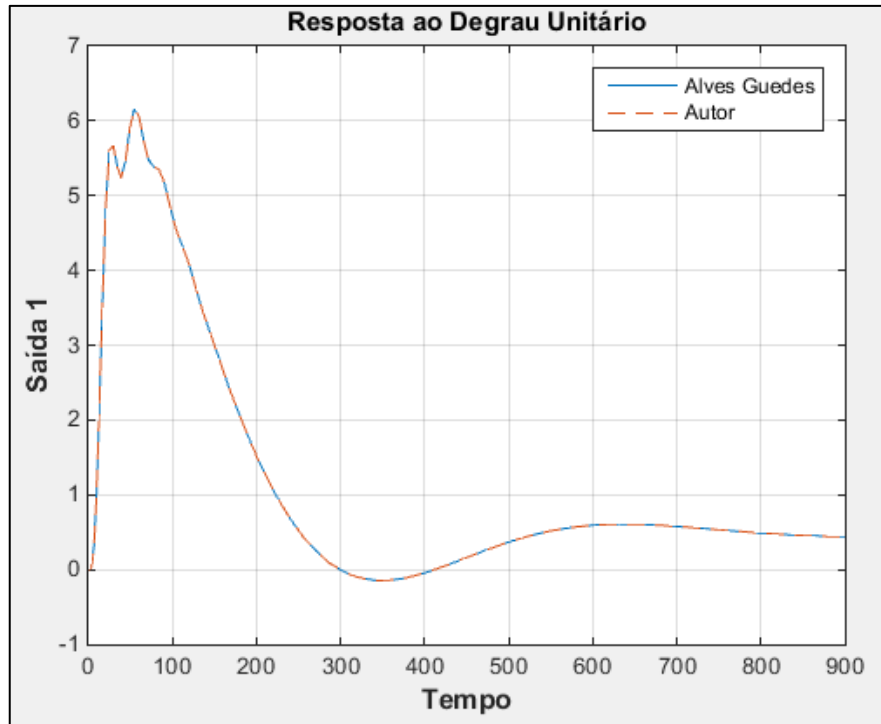


Figura 74 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

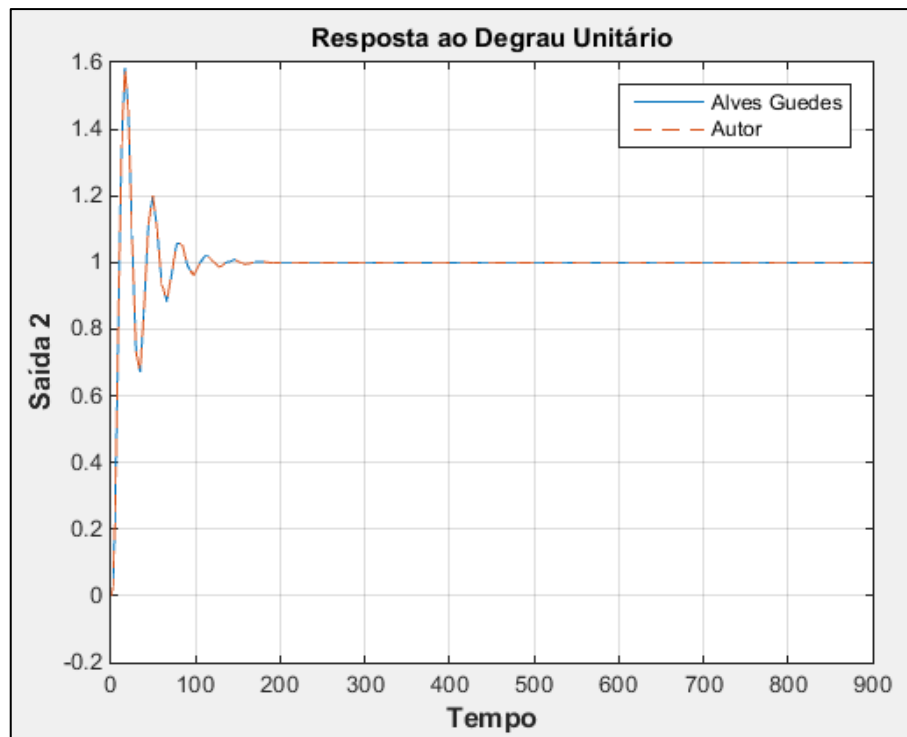


Figura 75 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 27374000                | 490.48                           | 5                          | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 274114                  | 515.65                           | 2                          | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 274114                  | 515.65                           | 2                          | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 121000                  | 69.27                            | 5                          | 129                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 882                     | 58.62                            | 4.21                       | 81.40                             |
| <b>Autor</b>                        | 882                     | 58.62                            | 4.21                       | 81.40                             |

Quadro 116 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

Esse ajuste não surtiu o efeito esperado. A saída 1 teve o sobressinal aumentado e a saída 2 houve de fato uma diminuição. Por isso, o próximo ajuste será ignorado o último ajuste fino feito na primeira saída e será alterado apenas a segunda saída, com a diminuição do ganho do controlador proporcional.

### AJUSTE FINO PROPORCIONAL

|              | <b>KP1</b>   | <b>KP2</b>   |
|--------------|--|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = -1.5 * 0.5$<br>$Kp1 = -1.5$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 435 * 0.5$<br>$Kp2 = 217.5$ |

Quadro 117 - Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 2478000                 | 557.48                           | 6                          | Não<br>Determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 244329                  | 542.02                           | 4.65                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 244329                  | 542.02                           | 4.65                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 89000                   | 52.9                             | 8                          | 98                                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 680.39                  | 43.58                            | 8.36                       | 77.32                             |
| <b>Autor</b>                        | 680.39                  | 43.58                            | 8.36                       | 77.32                             |

Quadro 118 - Resultado: Ajuste Fino Proporcional

Fonte: Autor

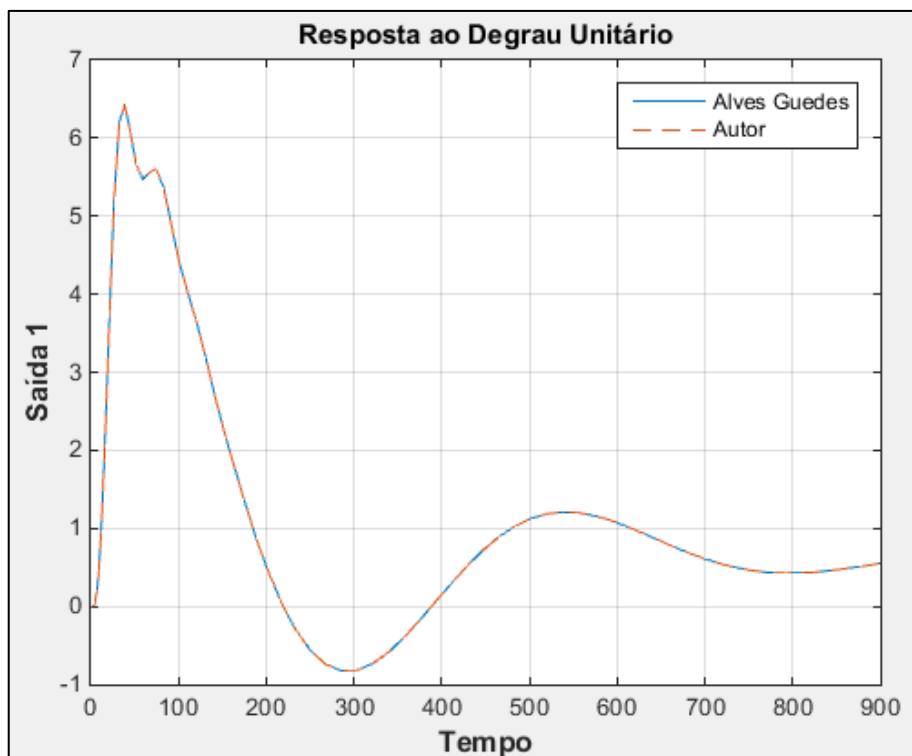


Figura 76 - Saída 1, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

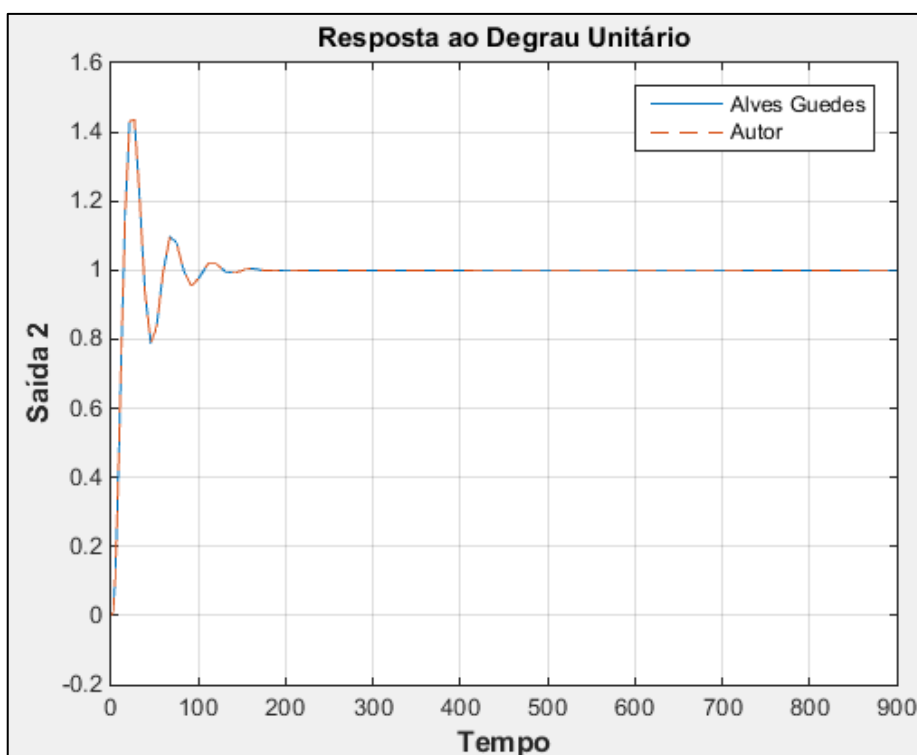


Figura 77 - Saída 2, Ajuste Fino Proporcional  
Fonte: Autor

### AJUSTE GROSSO PI

|            |  |
|------------|--|
| <b>Kp1</b> | $Kp1 (PI) = 0.9 Kp1$ $Kp1 (PI) = 0.9 * -1.5$ $Kp1 (PI) = -1.35$        |
| <b>TI1</b> | $TI1(PI) = 0.85 T_{osc1}$ $TI1(PI) = 0.85 * 416$ $TI1(PI) = 353.6$     |
| <b>Kp2</b> | $Kp2 (PI) = 0.9 Kp2$ $Kp2 (PI) = 0.9 * 217.5$ $Kp2 (PI) = 195.75$      |
| <b>TI2</b> | $TI2(PI) = 0.85 T_{osc2}$ $TI2(PI) = 0.85 * 17.68$ $TI2(PI) = 15.0279$ |

Quadro 119 - Ajuste Grosso PI  
Fonte: Autor

Esse ajuste instabilizou o sistema.

Deve-se então seguir a metodologia quando essa situação ocorre, que é alterar os parâmetros nos tempos de integração e derivação.

### AJUSTE FINO PI

O valor de TI é dobrado, obtém-se então:

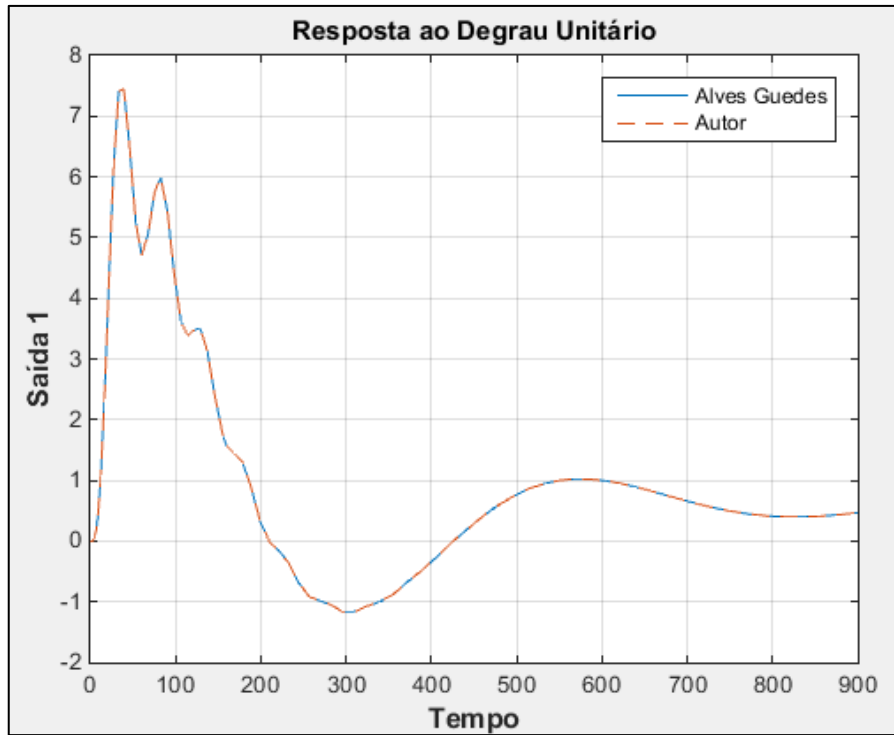


Figura 78 - Saída 1, Ajuste Fino PI  
Fonte: Autor

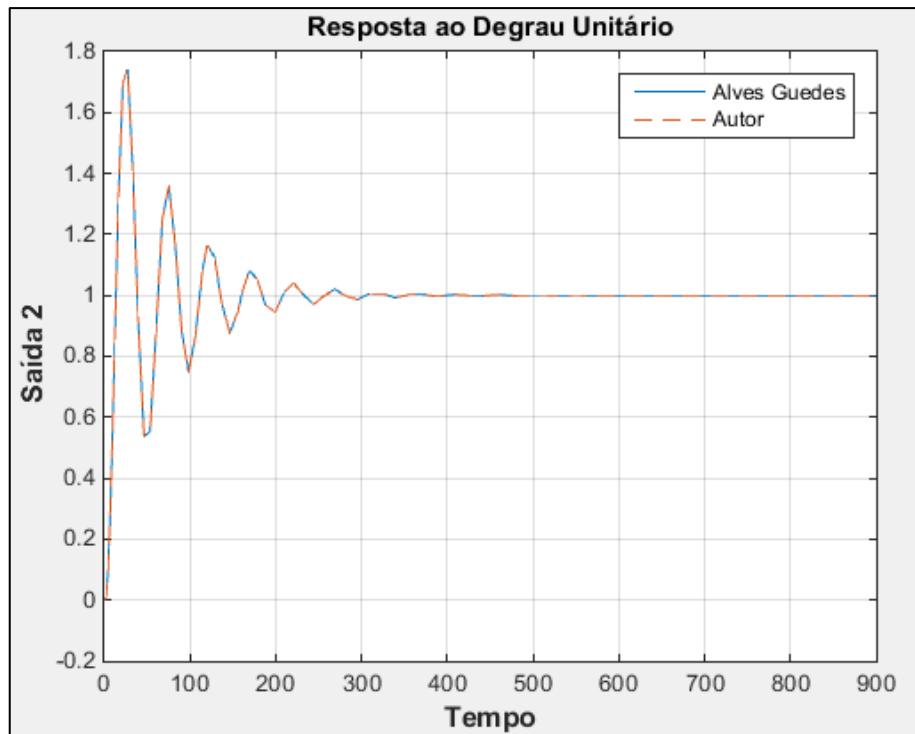


Figura 79 - Saída 2, Ajuste Fino PI  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 28835000                | 833.41                           | 10                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 278419                  | 644.02                           | 2.69                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 278419                  | 644.02                           | 2.69                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 791000                  | 74.41                            | 18                         | 324                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 2894.24                 | 73.41                            | 8.63                       | 176                               |
| <b>Autor</b>                        | 2894.24                 | 73.41                            | 8.63                       | 176                               |

Quadro 120 - Resultado: Ajuste Fino PI

Fonte: Autor

O ajuste efetuado conseguiu fazer com que o sistema não seja mais instável, mas os parâmetros como overshoot e tempo de estabilização foram aumentados, por isso, será iniciado o próximo ajuste afim de, tentar corrigir essas objeções.

## AJUSTE GROSSO PID

|            |   |
|------------|---|
| <b>Kp1</b> | $Kp1(PID) = 1.2 Kp1(PI)$ $Kp1(PID) = 1.2 * -1.35$ $Kp1(PID) = -1.62$          |
| <b>TI1</b> | $TI1 (PID) = 0.6 TI1(PI)$ $TI1 (PID) = 0.6 * 707.2$ $TI1 (PID) = 424.32$      |
| <b>TD1</b> | $TD1 (PID) = 0.25 TI1 (PID)$ $TD1 (PID) = 0.25 * 424.32$ $TD1 (PID) = 106.08$ |
| <b>Kp2</b> | $Kp2(PID) = 1.2 Kp2(PI)$ $Kp2(PID) = 1.2 * 48.94$ $Kp2(PID) = 58.73$          |
| <b>TI2</b> | $TI2 (PID) = 0.6 TI2(PI)$ $TI2 (PID) = 0.6 * 30.0558$ $TI2 (PID) = 18.03348$  |
| <b>TD2</b> | $TD2 (PID) = 0.25 TI2 (PID)$ $TD2 (PID) = 0.25 * 18.03348$ $TD2 (PID) = 4.51$ |

Quadro 121 - Ajuste Grosso PID

Fonte: Autor

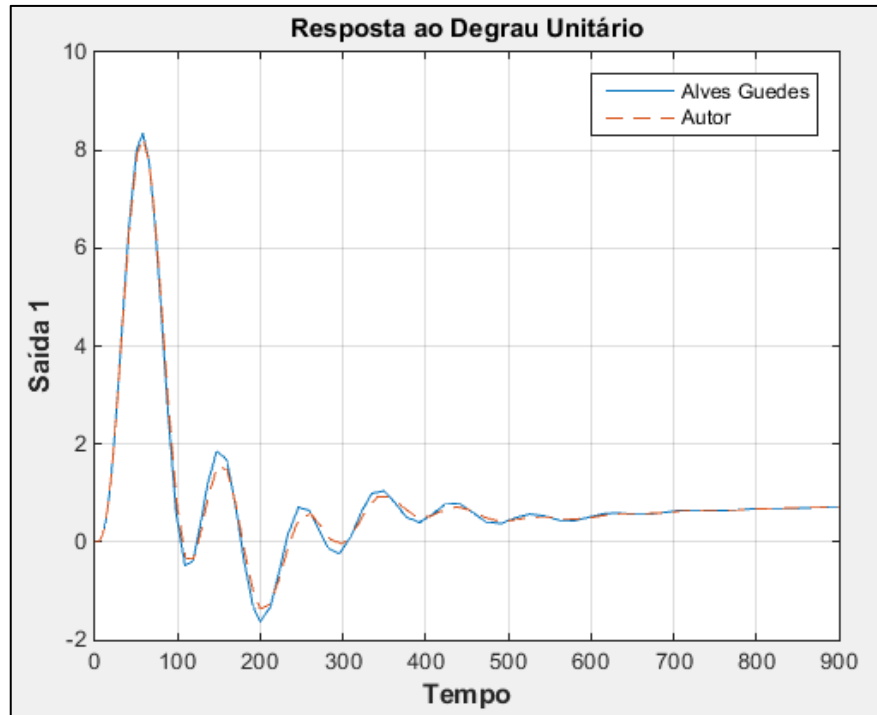


Figura 80 - Saída 1, Ajuste Grosso PID  
Fonte: Autor

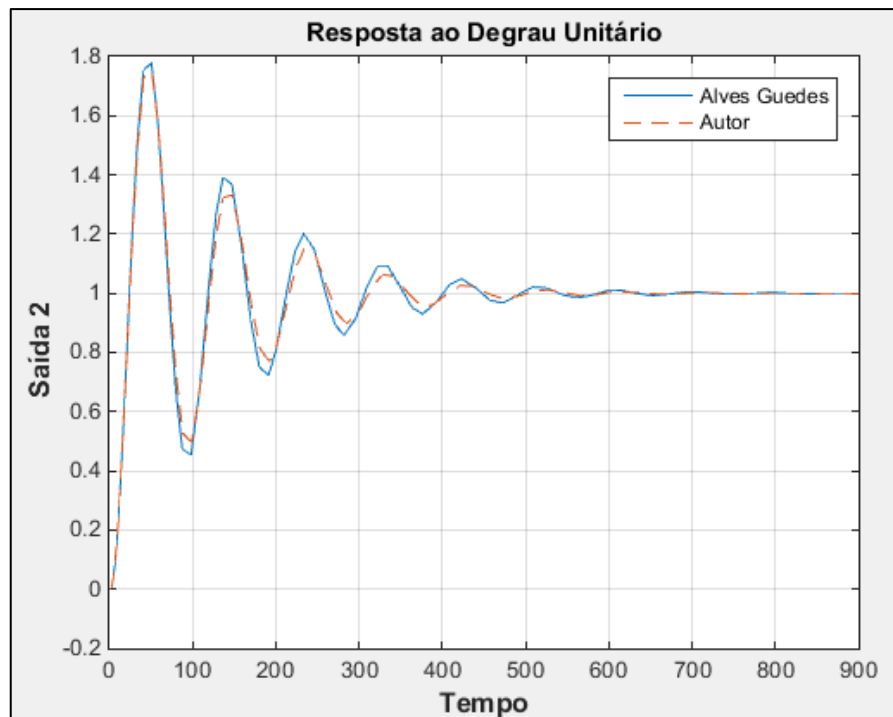


Figura 81 - Saída 2, Ajuste Grosso PID  
Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 23213000                | 731.06                           | 9                          | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 211892                  | 726.15                           | 7.88                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 201894                  | 724.65                           | 7.61                       | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 1893000                 | 74.63                            | 15                         | 522                               |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 10000                   | 75.34                            | 14.93                      | 344                               |
| <b>Autor</b>                        | 10000                   | 75.34                            | 14.93                      | 344                               |

Quadro 122 - Resultado: Ajuste Grosso PID  
 Fonte: Autor

### **AJUSTE FINO PID**

Com a tentativa de reduzir as oscilações o ponto de ajuste é deslocado no sentido de percurso "1", reduzindo assim o ganho proporcional de ambas as saídas.

|              | <b>KP1</b>   | <b>KP2</b>   |
|--------------|--|--|
| <b>Autor</b> | $Kp1 = Kp1_{grosso} * 0.5$<br>$Kp1 = -1.62 * 0.5$<br>$Kp1 = -0.81$ | $Kp2 = Kp2_{grosso} * 0.5$<br>$Kp2 = 58.73 * 0.5$<br>$Kp2 = 29.37$ |

Quadro 123 - Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 1</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 1</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 1</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 1</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 43813000                | 835.99                           | 11                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 387221                  | 844.70                           | 7.73                       | Não<br>determinado                |
| <b>Autor</b>                        | 366915                  | 833.726                          | 10.05                      | Não<br>determinado                |

|                                     | <b>ITAE<br/>Saída 2</b> | <b>Overshoot<br/>(%) Saída 2</b> | <b>Tsubida<br/>Saída 2</b> | <b>Testabilização<br/>Saída 2</b> |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| <b>Alves<br/>Guedes XT<br/>2002</b> | 6653000                 | 81.99                            | 12                         | Não<br>determinado                |
| <b>Alves<br/>Guedes<br/>Matlab</b>  | 50748.7                 | 85.35                            | 19.53                      | 750                               |
| <b>Autor</b>                        | 39940                   | 83.24                            | 19.55                      | 750                               |

Quadro 124 - Resultado: Ajuste Fino PID

Fonte: Autor

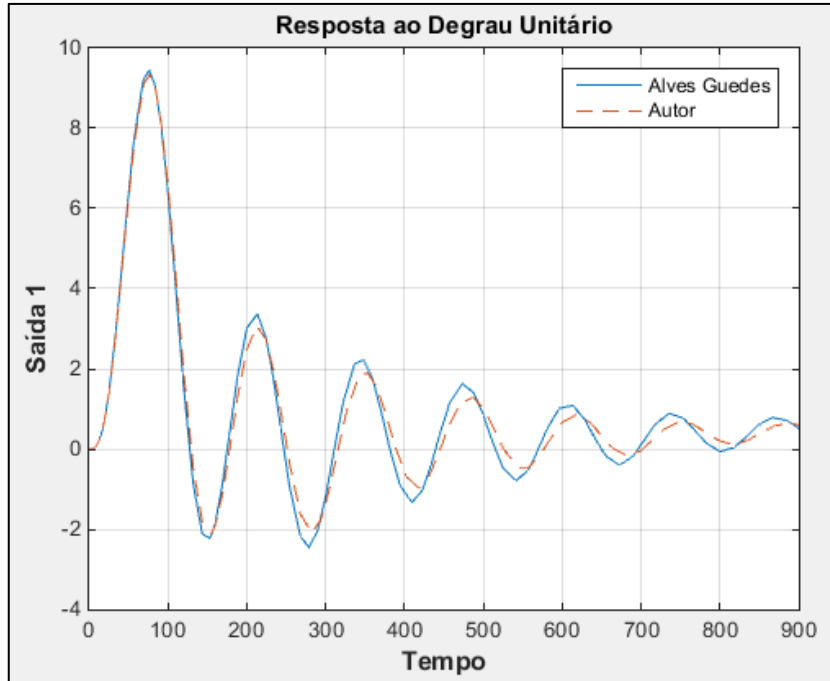


Figura 82 - Saída 1, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

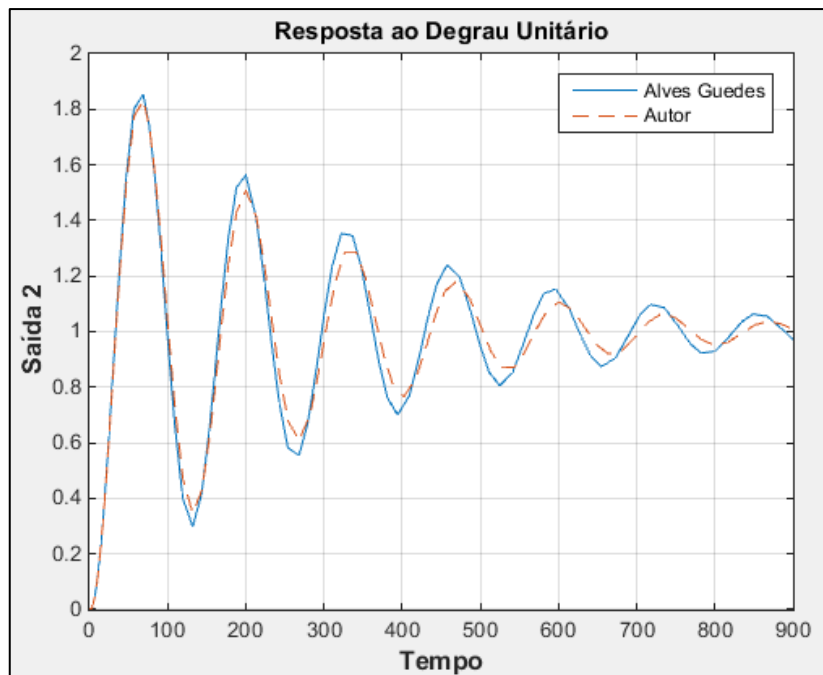


Figura 83 - Saída 2, Ajuste Fino PID  
Fonte: Autor

Os resultados desse ajuste obteve resultados indesejáveis, por isso esse último ajuste deve ser menosprezado.

Para esse processo em especial, somente o ajuste proporcional, se mostrou mais efetivo do que os demais.

Ficou evidente também que esse processo possui um comportamento bem presente de oscilações, o que dificulta o seu ajuste mesmo após a aplicação de demasiados refinamentos.

Com a finalização do último processo por meio da metodologia proposta, pode-se dizer que mesmo que alguns ajustes não tenham surtido efeito, em sua grande maioria os ajustes funcionaram de acordo com o que foi idealizado.

## 6. CONCLUSÕES

Há cerca de 30 anos atrás, o autor Alves (1988) desenvolveu uma metodologia empírica baseada em diversas outras literaturas para realizar o controle de sistemas multivariáveis utilizando o controlador PID. Em 1988, época em que o método foi pensado e criado não havia recursos tão avançados como nos dias atuais. A combinação de ferramentas computacionais avançadas, como o Matlab, e um hardware com alta capacidade de processamento nos fornece dados complexos em pouquíssimo espaço de tempo. Após a realização da metodologia e a quantificação dos dados obtidos por ela em alguns processos, nunca mais se pensou em realizar alguma verificação utilizando meios mais modernos e confiáveis para informar se de fato o método realmente funciona. Com base no que se discute neste capítulo e com o resultados apresentados no trabalho é possível fazer afirmações quanto à validação da metodologia.

A facilidade para atingir o procedimento descrito é um dos principais pontos fortes da metodologia. Sem dúvidas qualquer usuário novo ou avançado no campo da engenharia é capaz de efetuar sem resquícios de dificuldades. Essa característica é fundamental para conseguir a motivação e a atenção de pessoas que trabalham com esses controladores e buscam otimizar processos multivariáveis dentro do setor em que atuam.

O simulador criado para o desenvolvimento desse trabalho, a GUI, fornece um ambiente totalmente intuitivo e agradável para os usuários. A demonstração de resultados visuais e numéricos após cada simulação permite uma avaliação imediata e conclusiva, tornando a metodologia ainda mais simples.

Na primeira etapa, que é encontrar o valor crítico onde ocorre a oscilação de mesma amplitude, todos os resultados obtidos pelo autor desse trabalho ficaram muito próximo dos valores descritos por Alves (1988) e algumas situações os valores foram iguais. Isso demonstra que o simulador criado pelo Alves (1988) possui sim uma verossimilhança de dados comparado com o simulador criado no Matlab para fazer as análises desse trabalho.

Os demais parâmetros: *overshoot*, tempo de subida e tempo de descida, ficaram dentro de uma faixa aceitável, ora alternando para cima e ora alternando

para baixo, mas esses também se mostraram bem próximo dos valores gerados pelo Matlab.

O fator que mais sofreu divergências críticas, foi o erro (ITAE). Em comparação com o simulador utilizado nesse trabalho e o simulador utilizado pelo Alves (1988), os valores gerados pelo segundo se demonstrou com um erro muito superior em todos os casos e na aplicação de todas metodologias discutidas anteriormente. É um caso que precisa ser investigado para fazer uma afirmação da causa, mas talvez por ter utilizado métodos numéricos, aproximações e o recurso limitado pelo simulador/software na época pode ter sido o causador desse acúmulo de erros nos processos.

Em comparação com o método desenvolvido pelo Isermann, os resultados de todos os parâmetros desse trabalho se demonstrou superior, o que já indica indícios para a corroboração da metodologia se comparado com algo substancial já consolidado.

A reunião do ajuste grosso em primeira etapa, o ajuste fino como meio de correção e aprimoramento e, por fim, a possibilidade de recorrer à artificios caso o processo seja instável, torna a metodologia algo grande, pois ela oferece aos usuários diversos artificios para conseguir caminhos de se obter o ajuste em processos. Após todos os procedimentos demonstrados nesse trabalho fica claro que a metodologia adotada como referência têm real valor científico comprovado através de diferentes metodologias, em vários processos e utilizando ferramentas de cálculo e simulação de alto nível.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Péricles Guedes. **Controle PID Multivariável: Simulações e Procedimento de Ajuste**. 1988. Monografia (Graduação). – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1988.

ARRUDA, Lúcia, Maria Swiech, Flávio Junior & Myriam Delgado. **Um método evolucionário para sintonia de controladores PI/PID em processos multivariáveis**. Revista Controle e Automação, 2008. 1 - 16.

CASTRUCCI, Plínio de Lauro; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto Moura. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011.

CHENG, C.Y. **Autotuning of PID controllers: A Relay Feedback Approach**. 2° ed, Springer-Verlag, London, 2006.

CONG. s & Y. LIANG **.Pid-like neural network nonlinear adaptive control for uncertain multivariable motion control systems**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2009. 3872 - 3879.

COLOGNI, Mário Andrei. **Estudo e avaliação de auto-sintonia de controladores pid visando uma implementação em controlador industrial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

ISERMANN, Rolf. **Digital Control Systems**. 1.ed. German: Springer Verlag, 1981.

INSTITUTO TECNOLÓGICO da AERONÁUTICA – ITA; COURSERA. **Exemplos de Sistemas**. 2017. Disponível em: <<https://pt.coursera.org/learn/control/lecture/NoPcg/exemplos-de-sistemas>>. Acesso em: 20 Mar. 2017.

LEVINE, W. S. **The Control handbook**. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996.

**MATLAB.** The MathWorks. Versão R2017a.

NIEDERLÍNSKI, A. **A heuristic approach to the design of linear multivariable interacting control systems.** *Automatica* vol. 7, 1971. 691 – 701.

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle.** Tradução por Bernardo Severo da Silva Filho. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno.** Tradução por Heloísa Coimbra de Souza. 5.ed. São Paulo: Pearson, 2010.

PINTO, J. E. M. G. **Aplicação Prática do Método de Sintonia de Controladores PID Utilizando o Método do Relé com Histerese.** Tese (Pós-Graduação) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

RIBEIRO, M. A. **Controle de Processos.** 8.ed. Salvador, BA: Tek Treinamento & Consultoria., 2005, 141.

RUBAAI, A., M. J. C. Sitiriche & A. R Ofoli. **Design and implementation of parallel fuzzy pid controller for high-performance brushless motor drives: An integrated environment for rapid control prototyping.** *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2008. 1090 – 1098

SEFIANI, N.; CHEBLI. S.; ELAKKARY. A. **PID controller tuning using multi-objective ant colony optimization applied to TCP/AQM networks.** *IEEE Automation and Computing (ICAC)*, 2017.

SHUKOR, N. S. A.; AHMAD, M. A.; TUMARI, M. Z. M. **Data-driven PID tuning based on safe experimentation dynamics for control of liquid slosh.** *IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, 2017.

ZIEGLER, J. B. ; NICHOLS, N. B. **Optimum settings for automatic controls.** *Transactions ASME* 64, 1942. 759-768.

