

DÊNIS SOARES DE FREITAS

**CONTROLE DE FORÇA E ROTAÇÃO DE UMA
UNIDADE DE REPARO POR ATRITO USANDO
CONTROLADOR PID E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

DÊNIS SOARES DE FREITAS

**CONTROLE DE FORÇA E ROTAÇÃO DE UMA UNIDADE DE
REPARO POR ATRITO USANDO CONTROLADOR PID E
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sinésio D. Franco

Co-orientadora: Profª. Dra.-Ing. Vera Lúcia D. S. Franco

UBERLÂNDIA - MG

2014

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai Deli e a minha mãe Maria, que se sacrificaram para garantir meus estudos, a minha irmã Denise por me deixar sempre otimista com seu entusiasmo, a meus avós por me ensinarem a ter paciência e sabedoria, a minha namorada Monique pela companhia constante, e a todos os meus familiares e amigos pelo incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre iluminar meu caminho e me dar forças para seguir em frente.

Aos professores Sinésio Domingues Franco e Vera Lúcia D. S. Franco pela grande oportunidade de aprendizado no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da UFU ao longo do tempo de iniciação científica e de mestrado, além da compreensão, confiança e direcionamento fornecidos durante a execução deste trabalho.

Aos engenheiros Fernando Buiatti Rodrigues e Raphael Rezende Pires pela grande ajuda durante a realização dos ensaios executados no desenvolvimento desse trabalho.

A todos do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste por estarem sempre prontos a ajudar, e pela convivência ao longo do curso.

A todos os colegas de turma com quem convivi durante os anos de graduação e mestrado.

Ao CNPQ pela concessão de bolsa de estudos.

À Petrobras pelo apoio financeiro.

FREITAS, D. S. **Controle de Força e Rotação de uma Unidade de Reparo por Atrito usando Controlador PID e Inteligência Artificial**. 2014. 191 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova metodologia de controle de força e rotação para um equipamento que realiza ensaios de reparo por atrito. O principal desafio, neste caso, é a grande variação de torque que ocorre durante o processo de reparo, que pode resultar em instabilidade e travamento do sistema de rotação impedindo a realização completa do ensaio. O novo sistema de controle contou com a reestruturação elétrica e de programação do equipamento. Além disso, foram utilizados controladores do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) e RN (Rede Neural) para os controles de força e rotação, respectivamente. Para a definição do controlador RN do sistema de rotação, foram testadas várias estruturas, sendo que a que obteve o melhor desempenho foi a composta de um neurônio com função de ativação do tipo linear. O ajuste dos controladores foi feito a partir de um AG (Algoritmo Genético), utilizando modelos matemáticos obtidos a partir do processo de identificação e, posteriormente, o próprio equipamento. O AG foi desenvolvido para realizar o ajuste levando em consideração a integral do erro absoluto, o *overshoot* e o *settling time*, avaliados a partir de uma metodologia que utiliza a lógica *fuzzy*. Foi desenvolvido também um sistema antitravamento para reduzir as chances de travamento do sistema de rotação durante os ensaios, além de ter sido aplicada uma metodologia de despressurização rápida da linha hidráulica para reduzir os golpes de aríete que poderiam danificar o equipamento. Por fim, foram realizados ensaios para comparar o desempenho do sistema de controle anterior com o desenvolvido nesse trabalho e definir a nova faixa operacional do equipamento. O sistema que foi desenvolvido apresentou um desempenho consideravelmente melhor no controle de força e rotação e possibilitou que a nova faixa operacional do equipamento passasse a ser quase dez vezes a anterior.

Palavras-Chave: Reparo por atrito, Inteligência artificial, Algoritmos genéticos, Lógica fuzzy, Redes neurais, Controladores PID.

FREITAS, D. S. **Force and Rotational Speed Control of a Friction Hydro Pillar Processing Machine using PID Controller and Artificial Intelligence.** 2014. 191 f. Dissertation – Master in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, MG.

ABSTRACT

This work presents the development of a new method for force and rotational speed control of a machine that performs Friction Hydro Pillar Processing (FHPP) tests. The main challenge in this case is the large torque variation that occurs during the FHPP process that may result in instability and a system stalling. In order to develop the new control system it was necessary to restructure the electrical system and to reprogram the machine. Additionally, PID (Proportional Integral and Derivative) and NN (Artificial Neural Network) controllers were used to control the pin axial force and its rotational speed, respectively. To define the rotational speed NN controller, various NN structures were tested, whereby the best performance was obtained using a NN composed of one neuron with a linear activation function. A GA (Genetic Algorithm) made the adjustment of the controllers using mathematical models obtained from the system identification and FHPP machine itself. The GA was developed to perform the tuning taking into account the integral time absolute error, overshoot and settling time, which were evaluated from a methodology that uses the fuzzy logic. An anti-stalling system was developed to reduce the probability of locking up the rotation during the test and a methodology for rapid depressurization of the hydraulic system was introduced to reduce the fluid hammer effect that could damage the machine. Finally, FHPP tests were carried out to compare the performance of the new control system with the previous one and to define the new operating range of the machine. The developed system showed a considerably better performance in regard to the force and rotational speed control. The new operational range of the FHPP machine was increased about ten times regarding the previous one.

Keywords: FHPP, Artificial intelligence, Genetic algorithms, Fuzzy logic, Artificial neural networks, PID controllers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Trincas em tanques de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS (SOUZA, 2006)	2
Figura 1.2 – Esquema ilustrativo do processo conhecido como FHPP	3
Figura 1.3 – Esquema ilustrativo da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1) (HWANG, 2010)	4
Figura 1.4 – Carcaça do motor hidráulico danificada devido aos golpes de aríete (FORMOSO, 2012)	5
Figura 2.1 – Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito	11
Figura 2.2 – Variação dos parâmetros no processamento de pinos por atrito (adaptado de MEYER, 2003)	12
Figura 2.3 – Processo de costura por atrito (HWANG, 2010)	13
Figura 2.4 – Etapas executadas no processo de reparo por atrito	15
Figura 2.5 – Procedimento para a identificação de sistemas (LJUNG, 1999)	19
Figura 2.6 – Sistema de controle em malha fechada	20
Figura 2.7 – Resposta dinâmica de uma malha de controle (NICULA, 2010)	22
Figura 2.8 – Neurônio artificial modelado por McCulloch e Pitts	24
Figura 2.9 – Rede neural direta com duas camadas escondidas	24
Figura 2.10 – Estrutura do neurônio artificial sob o ponto de vista de controle (adaptado de SCHNITMAN, 1998)	25
Figura 2.11 – Operações básicas de um AG	26
Figura 2.12 – Exemplo de <i>crossover</i> a partir do método de recombinação intermediária	28
Figura 2.13 – Função de pertinência Gaussiana	31
Figura 2.14 – Raciocínio <i>fuzzy</i>	31
Figura 2.15 – <i>Defuzzificação</i> pelo método do centroide	33
Figura 3.1 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 - UPPA3 (adaptado de GONTIJO, 2012)	35
Figura 3.2 – Sistema hidráulico de aplicação de força da UPPA3	35
Figura 3.3 – Sistema hidráulico de rotação da UPPA3	36
Figura 3.4 – Sensores de rotação, torque e posição da UPPA3 (adaptado de BORGES, 2011)	37

Figura 3.5 – Visão geral do sistema de aquisição de dados da UPPA3	38
Figura 4.1 – Sistema original de controle de força e rotação da UPPA3	40
Figura 4.2 – Local de instalação dos sensores de pressão para obtenção da vazão nominal	42
Figura 4.3 – Esquema simplificado do circuito hidráulico do sistema de rotação	43
Figura 4.4 – Função de teste para obtenção da resposta do sistema de força para cada indivíduo	46
Figura 4.5 – Função de teste para obtenção da resposta do sistema de rotação para cada indivíduo	46
Figura 4.6 – Estrutura do sistema de comunicação para o ajuste dos controladores utilizando a planta real (UPPA3)	47
Figura 4.7 – Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> “ST” (“ <i>settling time</i> ”)	49
Figura 4.8 – Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> “OV” (“ <i>overshoot</i> ”)	50
Figura 4.9 – Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> “ITAE” (“integral do erro absoluto”)	51
Figura 4.10 – Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> “nota”	54
Figura 4.11 – Etapas executadas pela função de avaliação do AG	56
Figura 4.12 – Malha do sistema de controle de força da UPPA3	60
Figura 4.13 – Montagem do pino e do bloco na UPPA3 para o ajuste e teste do sistema de controle de força	63
Figura 4.14 – Procedimento executado pelo programa de teste e pelo CLP no teste dos indivíduos do AG que realiza o ajuste PID de força utilizando o sistema real	64
Figura 4.15 – Malha do sistema de controle de rotação da UPPA3	65
Figura 4.16 – Sistema hidráulico de controle de rotação da UPPA3 com as respectivas perdas de carga	66
Figura 4.17 – Sistema desenvolvido no Simulink® para o projeto do controlador do sistema de rotação	67
Figura 4.18 – Variação da vazão nominal adotada nos testes das redes neurais projetadas	68
Figura 4.19 – Torque simulado nos testes durante o ajuste das redes neurais projetadas	71
Figura 4.20 – Resposta em malha aberta do sistema utilizado nos testes das redes neurais para uma entrada degrau de amplitude 0,125	71
Figura 4.21 – Sistema de controle desenvolvido no Simulink® para os testes das RNs	72
Figura 4.22 – RNs projetadas para o sistema de controle de rotação	73
Figura 4.23 – Numeração de uma rede de seis neurônios	74
Figura 4.24 – Modelo utilizado na identificação do sistema de rotação	78

Figura 4.25 – Modelo da planta utilizando no processo de identificação do sistema de rotação	78
Figura 4.26 – Resposta em vazão da válvula do sistema de rotação da UPPA3 em função do sinal de entrada (BOSCH REXROTH AG, 2005)	79
Figura 4.27 – Sistema de controle desenvolvido no Simulink® para o ajuste da RN onde a rotação na faixa de 0 a 1 corresponde à faixa de 0 a 2.000 rpm	81
Figura 4.28 – Curva de vazão nominal utilizada durante o ajuste da RN no sistema de controle de rotação do Simulink®	82
Figura 4.29 – Curva de torque simulada durante o ajuste da RN no sistema de controle de rotação do Simulink®	82
Figura 4.30 – Distribuição dos pesos obtidos no ajuste PID pelo método da tentativa na RN de 1 neurônio com função de ativação linear	84
Figura 4.31 – Procedimento executado pelo programa de teste e pelo CLP no teste dos indivíduos do AG que realiza o ajuste da RN de controle de rotação utilizando o sistema real	85
Figura 4.33 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “A” (cotas em mm)	90
Figura 4.34 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “B” (cotas em mm)	91
Figura 4.35 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “C” (cotas em mm)	92
Figura 5.1 – Estrutura física do novo sistema de controle de força e rotação da UPPA3	94
Figura 5.2 – Digrama Grafcet do programa desenvolvido para o CLP da UPPA3	95
Figura 5.3 – Sinal de entrada da válvula utilizado no experimento de identificação da planta do sistema de força	100
Figura 5.4 – Sinal de saída obtido no experimento de identificação da planta do sistema de força	100
Figura 5.5 – Sinal de saída do sistema real e da função de transferência obtida na identificação	101
Figura 5.6 – Resultado do ajuste PID realizado pelo AG no controle de força da planta do Simulink®	102
Figura 5.7 – Resposta obtida pelo controlador PID, ajustado através do AG e utilizando a planta do Simulink®, quando implementado no sistema real de controle de força da UPPA3	103
Figura 5.8 – Resultado do ajuste PID realizado pelo AG no sistema real de controle de força da UPPA3	104

Figura 5.9 – Resultado do ajuste da RN de um neurônio com função de ativação linear na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	106
Figura 5.10 – Resultado do ajuste da RN de um neurônio com função de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	107
Figura 5.11 – Resultado do ajuste da RN de três neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	107
Figura 5.12 – Resultado do ajuste da RN de quatro neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _	109
Figura 5.13 – Resultado do ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	110
Figura 5.14 – Resultado do ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação quadrática na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação	111
Figura 5.15 – Resultado do ajuste da RN de quatro neurônios com funções de ativação linear, sigmoide e degrau na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	112
Figura 5.16 – Resultados obtidos pela RN selecionada e pelo controlador PID ajustado sem distúrbio no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	114
Figura 5.17 – Resultados obtidos pela RN selecionada e pelo controlador PID ajustado com distúrbio no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	115
Figura 5.18 – Sinais de entrada da válvula direcional proporcional e da bomba utilizados no experimento de identificação da planta do sistema de rotação _____	116
Figura 5.19 – Sinal de rotação obtido no experimento de identificação _____	117
Figura 5.20 – Sinal de vazão nominal obtido no experimento de identificação da planta do sistema de rotação _____	117
Figura 5.21 – Sinal de saída da planta obtido depois da divisão da rotação (entre 0 e 1) pela vazão nominal (em l/min) _____	119
Figura 5.22 – Sinal de saída da função não linear e da planta real nos pontos onde a rotação ficou estável _____	120
Figura 5.23 – Respostas obtidas pelo sistema real e pelo modelo desenvolvido no Simulink® para simular o comportamento do sistema de rotação da UPPA3 _____	121

Figura 5.24 – Resultado do ajuste da RN realizado pelo AG no controle de rotação da planta do Simulink®	122
Figura 5.25 – Resultado da RN ajustada pelo AG na planta do Simulink® quando aplicada ao sistema real de controle de rotação da UPPA3	123
Figura 5.26 – Pressão na entrada e na saída da válvula ao longo do tempo de teste de cada indivíduo durante o ajuste da RN feito pelo AG utilizando o sistema real	125
Figura 5.27 – Torque simulado no teste de cada indivíduo durante o ajuste da RN feito pelo AG utilizando o sistema real	125
Figura 5.28 – Resultado do ajuste da RN realizado pelo AG no sistema real de controle de rotação da UPPA3	127
Figura 5.30 – Interface do programa supervisorio desenvolvido para a realização de reparos por atrito na UPPA3	129
Figura 5.31 – Janela de inserção dos dados para a realização do ensaio de reparo por atrito na interface do programa supervisorio da UPPA3	130
Figura 5.29 – Desempenho do controle de rotação antes e depois da implementação do novo sistema	131
Figura 5.32 – Resultado do primeiro ensaio de reparo por atrito realizado com o novo sistema de controle da UPPA3	132
Figura 5.33 – Desempenho do controle de força e rotação da UPPA3 antes e depois da implementação do novo sistema	135
Figura 5.34 – Desempenho do controle de força antes e depois da implementação do novo sistema	137
Figura 5.35 – Resultado obtido no ensaio V1: geometria “A”, rotação de 1.700 rpm e força do primeiro estágio de 100 kN	139
Figura 5.36 – Resultado obtido no ensaio V2: geometria “B”, rotação de 1.700 rpm e força do primeiro estágio de 100 kN	141
Figura 5.37 – Resultado obtido no ensaio V3: geometria “B”	142
Figura 5.38 – Resultado obtido no ensaio V4: geometria “A”	143
Figura 5.39 – Resultado obtido no ensaio V5: força de 60 kN e rotação de 1.700 rpm	144
Figura 5.40 – Resultado obtido no ensaio V6: força de 60 kN e rotação de 1.700 rpm	145
Figura 5.41 – Resultado obtido no ensaio F1: força de 200 kN e comprimento de queima de 7 mm	147

Figura 5.42 – Resultado obtido no ensaio F2: força de 300 kN e comprimento de queima de 7 mm _____	148
Figura 5.43 – Resultado obtido no ensaio F3: força de 300 kN e comprimento de queima de 18 mm _____	150
Figura 5.44 – Resultado obtido no ensaio F4: força de 250 kN e comprimento de queima de 18 mm _____	152
Figura 5.45 – Resultado obtido no ensaio F5: força do segundo estágio de 400 kN _____	153
Figura 5.46 – Resultado do ensaio F6: geometria “A”, força de 40 kN e rotação de 1.000 rpm _____	155
Figura 5.47 – Resultado do reparo por atrito executado nos ensaios F4 e F6 _____	157
Figura 5.48 – Resultado obtido no ensaio F7: geometria “C”, força de 50 kN e rotação de 1.200 rpm _____	158
Figura 5.49 – Faixa operacional da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para um comprimento de queima menor ou igual a 6 mm _____	160
Figura 5.50 – Faixa operacional da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para qualquer valor de comprimento de queima _____	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Regras utilizadas no processo de inferência do sistema de avaliação <i>fuzzy</i> ____	53
Tabela 4.2 – Ordem do vetor de pesos para uma rede de seis neurônios _____	75
Tabela 5.1 – Configurações utilizadas para o teste de convergência do AG _____	97
Tabela 5.2 – Convergência obtida para o AG com as configurações de C1 a C7 _____	98
Tabela 5.3 – Novas configurações criadas para o AG a partir da análise dos efeitos dos parâmetros de desempenho _____	99
Tabela 5.4 – Configuração definitiva do AG _____	99
Tabela 5.5 – Desempenhos obtidos pelas RNs no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação _____	113
Tabela 5.6 – Ensaio de validação do novo sistema controle da UPPA3 _____	138
Tabela 5.7 – Ensaio executados para definir a nova faixa operacional da UPPA3 _____	146

LISTA DE SÍMBOLOS

- α_1 – Número aleatório entre 0 e 1
 α_2 – Valor igual a $(1-\alpha_1)$
 Δp – Diferença de pressão por aresta da válvula em bar
 Δp_0 – Diferença de pressão em bar quando a vazão nominal é igual a Q_n
 Δp_m ou Δp_m – Diferença de pressão no motor hidráulico em bar
 $\mu(x)$ – Função de pertinência da variável “x”
a, b, c, d e w – Constantes
 A_b – Porcentagem de abertura da válvula
 $e(k)$ – Sinal de erro (entrada - saída) em função de k
 $e(t)$ – Sinal de erro (entrada - saída) em função de t
 $f(u)$ – Função de ativação
 $G(s)$ ou $H(s)$ – Função transferência
ITAE – Integral do erro absoluto
k – Índice de amostragem do sinal
 K_d – Ganho derivativo
 K_i – Ganho integral
 K_p – Ganho proporcional do processo
M – Torque em N.m
 M_{rs} – Matriz de rotação estável
OV – *Overshoot* em (%)
P – Pressão de alimentação do sistema hidráulico em bar
Q – vazão em l/min
 Q_n – Vazão nominal em l/min quando Δp é igual a 5 bar
 Q_x – Vazão nominal real em l/min
R – Rotação em rpm
ReqITAE – requisito de desempenho de integral do erro absoluto
ReqOV – requisito de desempenho de *overshoot* em (%)
ReqST – requisito de desempenho de *settling time* em segundos
s – Parâmetro complexo proveniente da transformada de Laplace
SP – *Setpoint* (entrada)

ST – *Settling time* em segundos

t – Tempo em segundos

T_A – Tempo de acomodação em segundos

T_d – Constante de tempo derivativo

T_i – Constante de tempo integral

T_S – Tempo de subida

$u(k)$ – Sinal de controle em função de k

$u(t)$ – Sinal de controle em função de t

u_{nr} – Valor de entrada da planta quando a saída é igual a y_{nr}

y_{nr} – Maior valor de saída da planta do sistema de rotação obtido na identificação

LISTA DE ABREVIATURAS

AG – Algoritmo genético

CLP – Controlador Lógico Programável

FHPP – *Friction Hydro Pillar Processing*

FPSO – *Floating, Production, Storage and Offloading*

IHM – Interface Homem-Máquina

ITAE – Integral do erro absoluto

LTAD – Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

LVDT – *Linear variable differential transformer*

OPC – *OLE for Process Control*

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

RN – Rede Neural

RNA – Rede Neural Artificial

SISO – *Single Input Single Output*

SITB – System Identification Toolbox MathWork's

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

UPPA – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Processamento de Pinos por Atrito (FHPP)	10
2.2. Limites Operacionais da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA3)	14
2.3. Identificação de Sistemas Dinâmicos	16
2.4. Controladores PID	19
2.4.1. <i>Algoritmo Básico</i>	20
2.4.2. <i>Ajuste pelo Método da Tentativa</i>	21
2.5. Redes Neurais Artificiais	23
2.6. Algoritmos Genéticos (AGs)	25
2.7. Lógica Fuzzy	29
3. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PINOS POR ATRITO 3 (UPPA3)	34
3.1 Sistema Hidráulico	34
3.2 Instrumentação, Controle e Aquisição de Dados	36
4. PROJETO, AJUSTE E TESTE DO NOVO SISTEMA DE CONTROLE DA UPPA3	39
4.1. Reestruturação do Sistema de Controle	39
4.2. Desenvolvimento do Algoritmo Genético	45

4.3. Controle de Força	60
4.3.1. <i>Identificação da Planta</i>	61
4.3.2. <i>Ajuste do Controlador PID</i>	62
4.4. Controle de Rotação	65
4.4.1. <i>Projeto do Controlador</i>	65
4.4.2. <i>Identificação da Planta</i>	76
4.4.3. <i>Ajuste do Controlador</i>	80
4.5. Sistema Antitravamento	87
4.6. Realização de Ensaios de Reparo por Atrito	88
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.1. Reestruturação do Sistema de Controle	93
5.1.1. <i>Reestruturação Física</i>	93
5.1.2. <i>Desenvolvimento do Programa para o CLP</i>	94
5.2. Ajuste dos Parâmetros de Desempenho do AG	97
5.3. Controle de Força	99
5.3.1. <i>Identificação da Planta</i>	99
5.3.2. <i>Aplicação do AG na Planta Identificada</i>	102
5.3.3. <i>Aplicação do AG na Planta Real</i>	103
5.4. Controle de Rotação	105
5.4.1. <i>Projeto do Controlador</i>	105
5.4.2. <i>Identificação da Planta</i>	116
5.4.3. <i>Aplicação do AG na Planta Identificada</i>	122
5.4.4. <i>Aplicação do AG na Planta Real</i>	123
5.5. Ensaios de Reparo por Atrito	128

6. CONCLUSÃO	162
7. TRABALHOS FUTUROS	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	166

CAPÍTULO I

Introdução

Os custos de manutenção na indústria de produção de petróleo são extremamente elevados. Instalações *offshore* possuem elevado valor agregado e alto risco, principalmente quando a intervenção deve ser realizada em águas profundas ou ultra-profundas. Em média, a manutenção *offshore* é vinte vezes mais cara que uma manutenção convencional *onshore* (CAIXETA, 2011). Além dos custos do próprio processo de manutenção, são registradas perdas devidas à parada total ou parcial da produção. Portanto, existe uma grande preocupação em diminuir o número de paradas de um equipamento para manutenção, bem como o tempo de duração da mesma.

Dentre as principais causas de paradas de produção e intervenções para a manutenção, estão as ocorridas pela falha de sistemas ou estruturas por fadiga (TEBBETT *et al.*, 1988). Os movimentos das ondas introduzem carregamentos e tensões significativas nas estruturas que levam ao surgimento de trincas de fadiga em uniões soldadas (LOTSBERG; LANDET, 2005). A Figura 1.1 mostra a presença de trincas originárias por fadiga de baixo ciclo, de dimensões relativamente grandes, nas paredes de tanques de armazenamento em plataformas semi-submersíveis (FPSO – *Floating, Production, Storage and Offloading*) (SOUZA, 2006).

Um dos principais métodos empregados no reparo e enrijecimento de estruturas é a soldagem a arco voltaico (MINERALS MANAGEMENT SERVICE, 2000).

Neste caso, a fusão do material adicionado e do metal de base resulta em inconvenientes, tais como a adsorção de gases (oxigênio, nitrogênio e hidrogênio) da atmosfera pela poça de fusão, podendo levar à fragilização da região reparada (PIRES, 2007). Adicionalmente, pode-se ter a formação de poros no interior do cordão de solda. Tudo isso

dificulta o reparo, que eventualmente pode ser reprovado, gerando a necessidade de repetição do procedimento.



Figura 1.1 – Trincas em tanques de armazenamento de um FPSO da PETROBRAS (SOUZA, 2006)

Técnicas de reparo por atrito têm sido desenvolvidas como um método alternativo devido às necessidades de se minimizar as paradas de produção e de obter práticas mais seguras e flexíveis de manutenção no reparo em ambientes hostis (áreas com risco de explosão e espaços confinados). Dentre essas técnicas, pode ser citado o processamento de pinos por atrito ou FHPP (*Friction Hydro Pillar Processing*), que foi desenvolvido em 1990 por Andrews e Mitchel (1990) e é baseado nos princípios da solda por atrito (MEYER, 2001).

O FHPP consiste basicamente no preenchimento de um furo não passante por intermédio da introdução de um pino (consumível), estando este submetido a uma velocidade de rotação e a esforços de compressão contra a cavidade do furo, como pode ser visto na Figura 1.2.

Pelo fato do FHPP ocorrer no estado sólido, problemas como trincas, porosidades, adsorção de gases e contaminação são menos críticos ao processo (SALAMA; LOTSBERG, 2004).

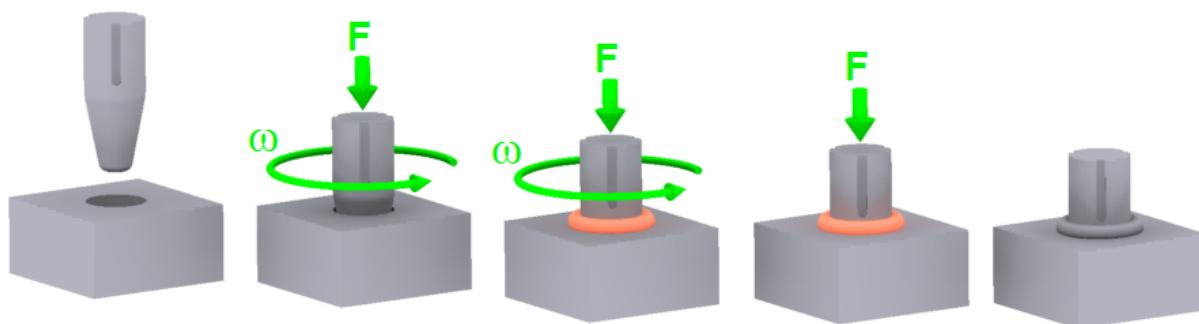


Figura 1.2 – Esquema ilustrativo do processo conhecido como FHPP

Devido ao seu curto ciclo térmico e baixo aporte de calor, o processo poderá, potencialmente, vir a ser empregado em linhas de transporte de petróleo, gás e metanol, sem a necessidade de paradas de produção. Tem-se, assim, um método com elevado potencial de uso na indústria *offshore* em atmosferas explosivas (BLAKEMORE, 1999).

Resultados positivos já vêm sendo obtidos há vários anos com a soldagem de pinos por atrito em plataformas e estruturas marítimas do mar do Norte. A técnica foi empregada com sucesso na fixação de anodos de sacrifício, visando a proteção catódica de estruturas de aço contra a corrosão marítima (NICHOLAS, 1984).

Visando o reparo de trincas em membros que falharam mediante ciclos de fadiga, estudos citados por Blakemore (1995) têm mostrado um bom desempenho das soldas por atrito no estado como soldado (sem tratamento térmico). Esse bom desempenho tem sido atribuído, em parte, à presença de tensões residuais compressivas dentro da união soldada, que aumentam a vida em solicitações envolvendo fadiga.

No Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), a exploração da técnica de reparo por atrito iniciou-se com a construção da primeira Unidade de Processamento de Pinos por Atrito (UPPA1), apresentada na Figura 1.3. Para explorar diferentes faixas de operação, outras três versões foram desenvolvidas, UPPA2, UPPA3 e UPPA4, sendo esta última portátil, visando a flexibilidade para aplicações em campo e em ambiente submerso.

Diversos trabalhos com o objetivo de aperfeiçoar o processo de reparo por atrito foram desenvolvidos a partir das unidades UPPA1, UPPA2, UPPA3 e UPPA4, onde foram relatadas várias condições nas quais ocorreram instabilidade e travamento do sistema de rotação para determinados parâmetros de ensaio adotados, impedindo que o reparo fosse concluído (SOUZA, 2006; PIRES, 2007; CAIXETA, 2011; BORGES, 2011; FORMOSO, 2012).

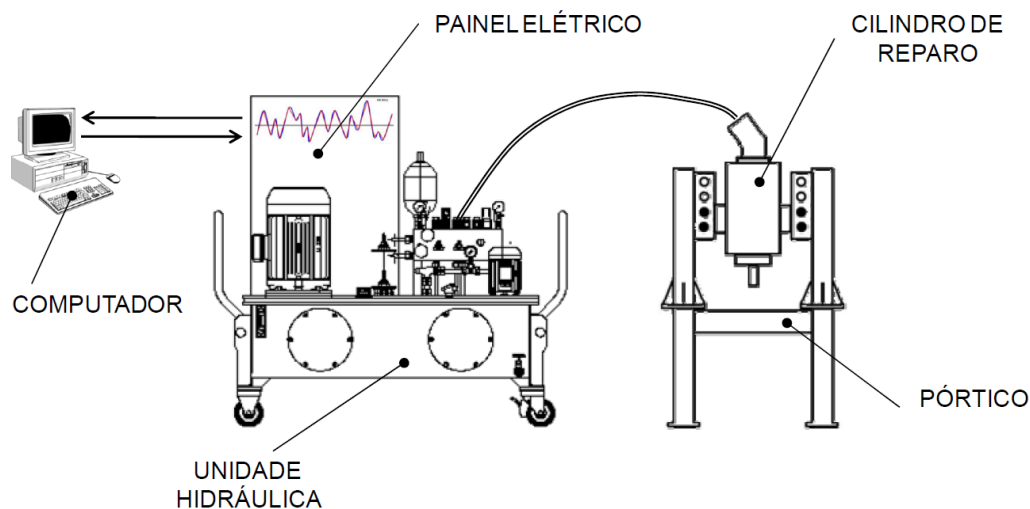


Figura 1.3 – Esquema ilustrativo da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 1 (UPPA1) (HWANG, 2010)

Um dos problemas no controle de rotação durante o processo de reparo por atrito é a grande variação no torque. O torque é influenciado principalmente pelas geometrias do pino e do bloco (material de base) e pelos valores de rotação e força adotados para o reparo. No início do processo, quando há o primeiro contato entre pino e bloco, há um forte aumento do torque, estando nesta etapa a maior chance de ocorrer o travamento do sistema de rotação, o que impede a completa execução do reparo. Caso o travamento não ocorra, a resistência mecânica do material diminui devido ao aquecimento gerado pelo atrito e, conseqüentemente, o torque diminui significativamente, o que pode provocar oscilações e instabilidade na velocidade de rotação.

Souza (2006) relata a ocorrência de travamentos na UPPA1 para ensaios com rotação de 5.000 rpm e força de 5 kN, equivalente a 10% da capacidade de carga do equipamento. Já na UPPA2, Caixeta (2011) afirmou que ocorreu travamento em todas as tentativas de realização de ensaios com rotação inicial abaixo de 1.800 rpm, independente do valor de força. Para rotações acima desse valor, afirmou ainda que a força não deveria ultrapassar 160 kN, sendo a capacidade do equipamento de 250 kN.

Borges (2011), por sua vez, observou travamentos em quase todos os ensaios realizados com pinos e furos com geometria cônica nos quais a força inicial aplicada era igual a 100 kN, equivalente a 25% da capacidade da UPPA3, mesmo utilizando a rotação máxima da mesma, de 1.700 rpm. Utilizando forças maiores, houve travamento em todos os ensaios.

Além da instabilidade no controle da rotação, Formoso (2012) afirma que, mesmo com rotação inicial de 5.000 rpm, uma força de 20 kN, equivalente a 50% da capacidade da UPPA4, foi suficiente para provocar o travamento do sistema de rotação. Nesse caso, ainda foram realizadas modificações com o objetivo de aumentar a capacidade de torque do equipamento e, conseqüentemente, diminuir as chances de ocorrer o travamento. Porém, após alguns testes, houve o rompimento da carcaça do motor hidráulico, como pode ser visto na Figura 1.4. Isso aconteceu devido aos golpes de aríete gerados não só no travamento, mas também nas paradas ao fim do processo de reparo, que são muito bruscas.

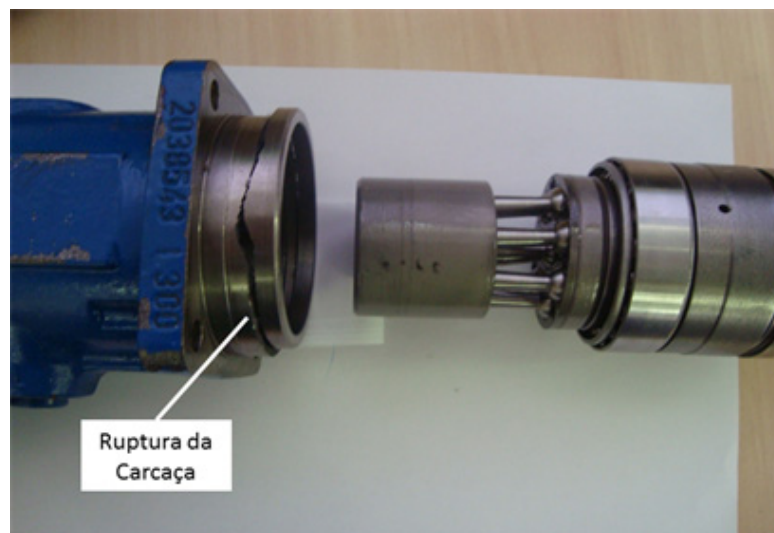


Figura 1.4 – Carcaça do motor hidráulico danificada devido aos golpes de aríete (FORMOSO, 2012)

Na UPPA3, a ser utilizada no presente trabalho, assim como em todas as UPPAs, o controle de rotação foi realizado a partir de um cartão PID (Proporcional, Integral e Derivativo). O baixo desempenho do cartão PID no controle de rotação em determinadas condições de operação pode ser devido a dificuldades no seu ajuste ou mesmo pelo fato de esse tipo de controlador não levar em consideração parâmetros importantes que modificam de forma significativa o comportamento do sistema, como, por exemplo, a variação de torque. Como nesse processo há grandes variações no torque, isso influi diretamente no comportamento do sistema de rotação, de forma que o controlador PID, que geralmente é ajustado com o sistema em vazio, passa a não responder de forma satisfatória quando ocorre, por exemplo, um aumento elevado no torque, gerando instabilidade e levando, eventualmente, ao travamento.

Com o objetivo de reduzir a probabilidade de travamento durante os ensaios e manter a estabilidade do sistema de rotação, pretende-se, nesse trabalho, utilizar um controlador do tipo rede neural, já que nesse tipo de controlador poderão ser utilizadas informações relativas às mudanças provocadas no comportamento do sistema quando há variação de torque.

Recentemente, as redes neurais artificiais (RNAs) ganharam uma popularidade considerável na comunidade de controle devido às suas características versáteis como a capacidade de aprendizagem, mapeamento não-linear e processamento paralelo. Sua grande vantagem é a capacidade arbitrária de aproximação do mapeamento linear ou não-linear através da aprendizagem. Com isso, elas têm provado ser uma ferramenta ideal para o controle de sistemas dinâmicos complexos não-lineares. A ideia básica do controle baseado em RNAs é aprender a dinâmica não-linear desconhecida e compensar incertezas estruturadas e não estruturadas existentes no modelo dinâmico (KUMAR *et al.*, 2013).

No sistema de rotação da UPPA3, ao fim do ensaio de reparo por atrito, a válvula direcional proporcional responsável pelo controle é fechada instantaneamente, provocando golpes de aríete que podem danificar seriamente o equipamento. Para evitar os golpes de aríete, pretende-se, neste trabalho, introduzir o fechamento dessa válvula através de uma rampa, procurando preservar a integridade do equipamento.

Como mencionado anteriormente, na etapa inicial do reparo por atrito há um aumento muito elevado no torque. Além disso, sabe-se que o torque aumenta com o aumento da força aplicada durante o processo. Assim, pretende-se também realizar o controle de força dessa unidade através de um controlador PID combinado com um sistema antitravamento.

O trabalho em conjunto do controlador PID e do sistema antitravamento deve realizar o controle de força no nível estabelecido para o ensaio desde que esse nível não provoque um torque superior à capacidade do sistema de rotação. Caso a capacidade máxima de torque do sistema de rotação seja atingida, o sistema antitravamento passa a atuar mantendo a força no máximo valor possível que não provoque um torque acima da capacidade e nem exceda o nível máximo de força estabelecido para o ensaio. Dessa forma, esse sistema deve, além de realizar o controle de força de acordo com o estabelecido, impedir o travamento do sistema de rotação não só no início, mas durante todo o processo de reparo por atrito.

Assim, o controle de rotação deverá ser realizado por um controlador do tipo rede neural e o de força por um controlador PID combinado com um sistema antitravamento. Pode-se perceber que não é possível implementar esse sistema a partir dos cartões que eram utilizados no controle de força e rotação, já que estes são apenas controladores PID simples.

Diante disso, todo o sistema de controle proposto deverá ser implementado a partir de um CLP (Controlador Lógico Programável).

No que se refere ao ajuste de controladores, destaque deve ser dado ao algoritmo genético (AG), que tem se mostrado um método eficiente dentre os diversos existentes (SEYEDKAZAEMI *et al.*, 2007; CHE *et al.*, 2010; JINHUA *et al.*, 2009; NAHAPETIAN *et al.*, 2008; JAEN-CUELLAR *et al.*, 2013).

No ajuste de controladores através de AGs, deve-se escolher uma função que se queira minimizar ou maximizar dependendo da situação, a qual é denominada função de avaliação. Essa função define quais são os melhores parâmetros para o controlador. É comum utilizar, por exemplo, a integral do erro absoluto do sistema como função de avaliação. Porém, escolhendo-se esta função, outros parâmetros de desempenho importantes como *overshoot* e *settling time* são desconsiderados. Dessa forma, para um ajuste otimizado, é necessário levar em conta esses três parâmetros e, para este fim, objetiva-se, nesse trabalho, utilizar a lógica *fuzzy*.

Para ajustar um controlador é comum realizar a identificação da planta, pois trabalhar com um modelo teórico traz muitas vantagens do ponto de vista de velocidade de processamento, permitindo a aplicação de diversos métodos de sintonia de forma mais simplificada e rápida. Porém, devem ser ressaltadas as dificuldades encontradas no processo de identificação, pois além da necessidade de experiência para obter um bom resultado, nem sempre um modelo linear é suficiente para descrever de forma satisfatória as características de um sistema.

O ajuste de um controlador utilizando o sistema real é mais complexo, pois envolve a necessidade de um planejamento mais bem elaborado do procedimento, já que, nesse caso, devem ser levadas em consideração questões relativas à segurança do operador e do equipamento. Além disso, dependendo das características do sistema e do método de ajuste, esse procedimento pode necessitar de muito tempo para sua execução, tornando-o inviável. Utilizando um AG para o ajuste, por exemplo, é necessário executar um número elevado de testes no sistema a cada geração. Assim, se a quantidade de gerações e o tempo necessário para cada teste forem muito grandes, o processo de ajuste pode necessitar de tanto tempo que sua execução se torna impraticável.

Considerando as dificuldades e incertezas do processo de identificação, nesse trabalho pretende-se utilizar os modelos matemáticos obtidos a partir da mesma apenas para um primeiro ajuste dos controladores através do AG. Para viabilizar o ajuste final, o objetivo é

utilizar as constantes dos controladores obtidas através do ajuste do modelo matemático na definição do intervalo de criação da população inicial do AG que irá realizar o ajuste no sistema de controle real.

Assim, o objetivo principal do presente trabalho é otimizar o controle de força e rotação da UPPA3, evitar o travamento durante os ensaios e ainda garantir a segurança do equipamento. Para isso, pretende-se:

- Desenvolver um AG para o ajuste de controladores, tanto em plantas teóricas (modelos matemáticos) quanto em sistemas reais, o qual deve utilizar a lógica *fuzzy* para avaliar ao mesmo tempo a integral do erro absoluto, o *overshoot* e o *settling time* durante o ajuste;
- Projetar e ajustar um controlador do tipo rede neural para realizar o controle de rotação da UPPA3;
- Projetar um sistema antitravamento que, em conjunto com um controlador PID, deverá realizar o controle de força da UPPA3 e impedir que esta atinja um nível que provoque o travamento do motor hidráulico durante o ensaio;
- Realizar a reestruturação do sistema de controle da UPPA3 de forma a transferir o controle de força e rotação dos cartões PID para um CLP, onde serão implementados os controladores desenvolvidos nesse trabalho;
- Obter os modelos matemáticos das plantas de força e rotação através do processo de identificação;
- Ajustar os controladores através do AG desenvolvido, utilizando tanto os modelos matemáticos obtidos pela identificação quanto o sistema real;
- Realizar os ensaios de reparo por atrito finais para validação do novo sistema de controle.

Para maior clareza e melhor compreensão, este trabalho está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes a este trabalho, tais como: processamento de pinos por atrito (FHPP), identificação de sistemas dinâmicos, controladores PID, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e lógica fuzzy;
- No Capítulo III é descrita a estrutura hidráulica e de instrumentação e controle da UPPA3;

- No Capítulo IV é apresentada a metodologia para a reestruturação do sistema de controle, o projeto e implementação dos controladores no CLP, o desenvolvimento e aplicação do AG no ajuste dos mesmos e a realização dos ensaios finais para testar o novo sistema;
- No Capítulo V são apresentados os resultados obtidos e a discussão dos mesmos em função do desempenho dos controladores do novo sistema atuando de forma isolada e durante os ensaios de reparo por atrito;
- No Capítulo VI são apresentadas as principais conclusões;
- No Capítulo VII são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros;
- Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas citadas neste trabalho.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

Este capítulo trata de alguns temas importantes para a compreensão deste trabalho e para a posterior discussão dos resultados, tais como: processamento de pinos por atrito (FHPP), limites operacionais da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA3), identificação de sistemas dinâmicos, controladores PID, redes neurais, algoritmos genéticos e lógica *fuzzy*.

2.1. Processamento de Pinos por Atrito (FHPP)

O processamento de pinos por atrito, também conhecido como “Friction Hydro Pillar Processing” (FHPP), é um processo desenvolvido ao longo da década de 90 e caracterizado como um processo de soldagem por atrito não convencional (PIRES, 2007). Devido à possibilidade de utilização desta técnica no reparo de trincas em estruturas *offshore* e tubulações de gás e petróleo, ela apresenta um forte atrativo principalmente para indústrias de petróleo e naval.

A primeira etapa do FHPP é abertura de um furo cego (não passante). Em seguida, é realizado o preenchimento desse furo por intermédio da introdução coaxial de um pino (consumível), estando este submetido a uma velocidade de rotação, e a esforços de compressão contra a cavidade do furo. Devido ao calor gerado pela interação entre as superfícies em contato, o material do pino é mantido em uma condição viscoplástica, permitindo o fluxo de material, que se desenvolve ao longo da direção axial do consumível,

promovendo-se, assim, o completo preenchimento do furo (PIRES, 2007). A Figura 2.1 apresenta um esquema ilustrativo do processo.

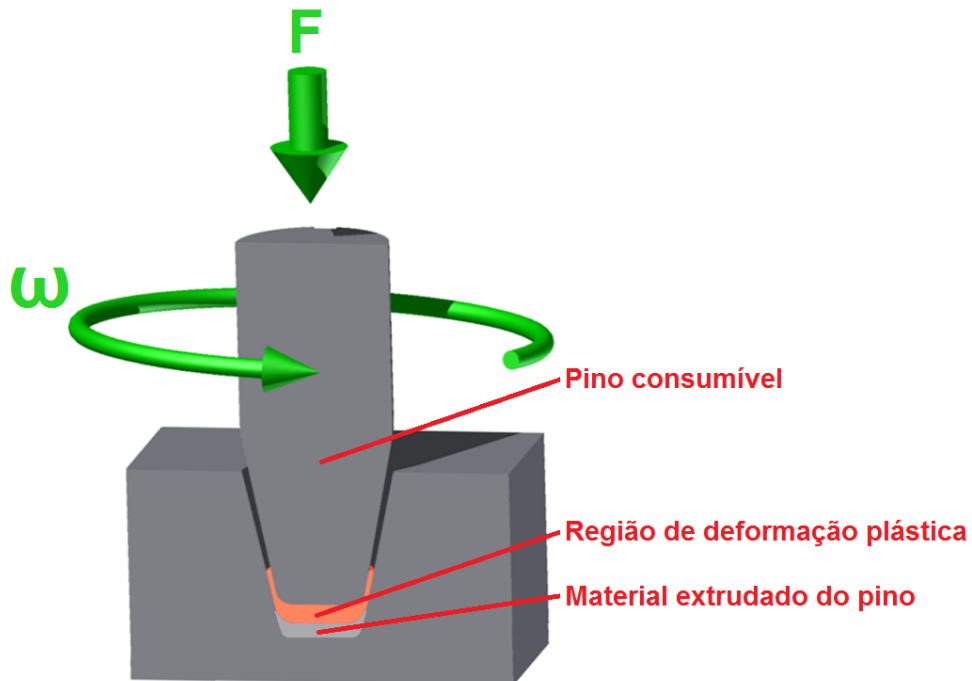


Figura 2.1 – Esquema ilustrativo do processamento de pinos por atrito

Além da geometria cilíndrica, também são utilizadas cavidades e pinos cônicos, sendo que a geometria escolhida é um fator que tem influencia direta na qualidade do preenchimento.

Na Figura 2.2 são apresentadas as variações dos parâmetros força, torque, rotação e comprimento de queima (comprimento do pino que foi consumido) durante um ensaio de processamento de pinos por atrito. Pode ser visto que o primeiro pico de torque ocorre logo no início do ensaio, ao fim da etapa I. Com isso, essa etapa apresenta o maior risco de travamento do sistema de rotação que, quando ocorre, leva esta a zero e impede a realização completa do preenchimento. Ao longo do ensaio também pode ser observado um segundo pico de torque, que surge ao fim da etapa III, quando a rotação é levada a zero intencionalmente e, portanto, o travamento do sistema de rotação nessa etapa não traz prejuízos à realização do preenchimento. A descrição completa das etapas do processamento de pinos por atrito, mostradas na Figura 2.2, pode ser encontrada no trabalho de Meyer (2003).

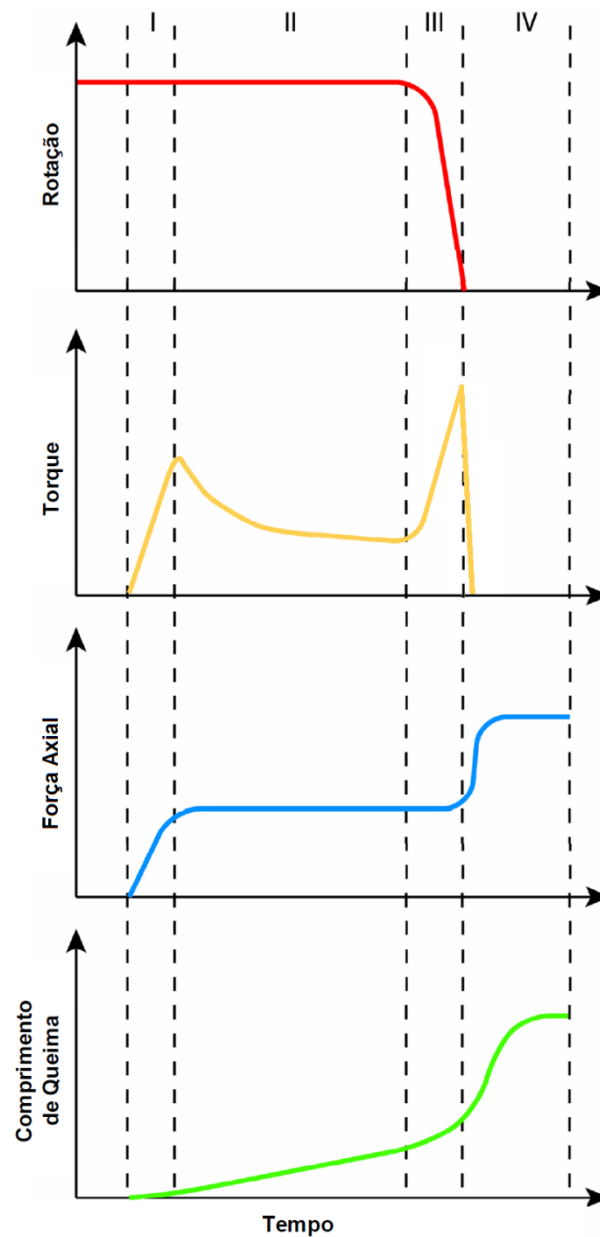


Figura 2.2 – Variação dos parâmetros no processamento de pinos por atrito (adaptado de MEYER, 2003)

Uma das variações do FHPP, usado no reparo de trincas por atrito, é o processo de costura por atrito (*Stitch Welding*), que nada mais é do que a sobreposição de eventos, realizados através da técnica de processamento de pinos por atrito, ao longo do comprimento de uma falha a ser reparada (PIRES, 2007). Na Figura 2.3 é apresentado um exemplo do processo de costura por atrito.

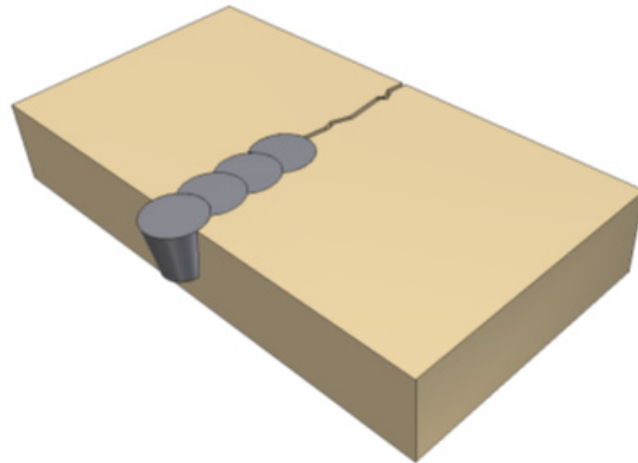


Figura 2.3 – Processo de costura por atrito (HWANG, 2010)

O FHPP tem se mostrado promissor para a união e o reparo em placas espessas de materiais ferrosos e não ferrosos, inclusive podendo ser aplicado no reparo de componentes em usinas nucleares (DELANY *et al.*, 2005).

Com base nos trabalhos realizados por Pires (2007), Ellis (1972), Nicholas (1984), Blakemore (1993), Blakemore (1999), Pinheiro (2001) e Meyer (2003), podem ser mencionadas as seguintes vantagens e limitações do FHPP:

Vantagens:

- O processo é considerado auto-limpante, pois, mediante à dinâmica do processo, existe uma tendência em eliminar as impurezas, as quais ficam presas no material do “flash” (rebarba), dispensando a necessidade de uma atenção especial com a limpeza das superfícies a serem unidas;
- Não é necessário o emprego de um fluxo de metal de enchimento e gás protetor;
- O processo não gera a emissão de gases tóxicos, além de ser mais seguro devido à ausência de fagulhas;
- Ausência de problemas associados a fenômenos de solidificação, tais como porosidade, segregação e adsorção de hidrogênio, uma vez que o processo ocorre no estado sólido;
- Formação de uma estreita zona termicamente afetada;
- Baixo calor introduzido e rápidos ciclos do processo o tornam favorável a aplicações em oleodutos operantes, linhas de gás e metanol;

- Permite a união de metais dissimilares, difíceis ou até mesmo impossíveis de serem soldados por outros processos;
- O processo pode ser automatizado, permitindo que o equipamento possa ser operado a longas distâncias, adequado para aplicação em áreas classificadas e de difícil acesso pelo operador;
- Não há a necessidade da utilização de operadores com habilidades manuais específicas;
- Na grande maioria dos casos, a resistência da solda é igual ou até mesmo superior à dos metais de base (do tipo *overmatching*).

Limitações:

- Pelo menos uma das peças deve possuir um eixo de revolução, de modo que a peça possa girar sobre o eixo do plano de soldagem;
- Um dos materiais a serem unidos deve ser passível de deformação plástica;
- A preparação e o alinhamento das peças podem ser um ponto crítico, para o desenvolvimento uniforme da deformação plástica e aquecimento da superfície de atrito;
- O processo é normalmente limitado para a execução de juntas de topo planas ou angulares (cônicas);
- Custo inicial elevado com o equipamento e ferramentas.

2.2. Limites Operacionais da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA3)

Como mencionado anteriormente, a UPPA3 é um equipamento que foi construído para explorar a técnica de reparo por atrito no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). As capacidades máximas de força e rotação desse equipamento são respectivamente de 400 kN e de 1.700 rpm.

Na UPPA3, os ensaios de reparo por atrito podem ser realizados com um ou dois estágios. Considerando a sequência da execução do reparo apresentada na Figura 2.4, no caso da utilização de dois estágios, a etapa de aplicação de força e rotação pode ser dividida em duas sub-etapas, onde os valores de força aplicada são diferentes. No caso da utilização de apenas um estágio, utiliza-se apenas um valor de força nessa etapa.

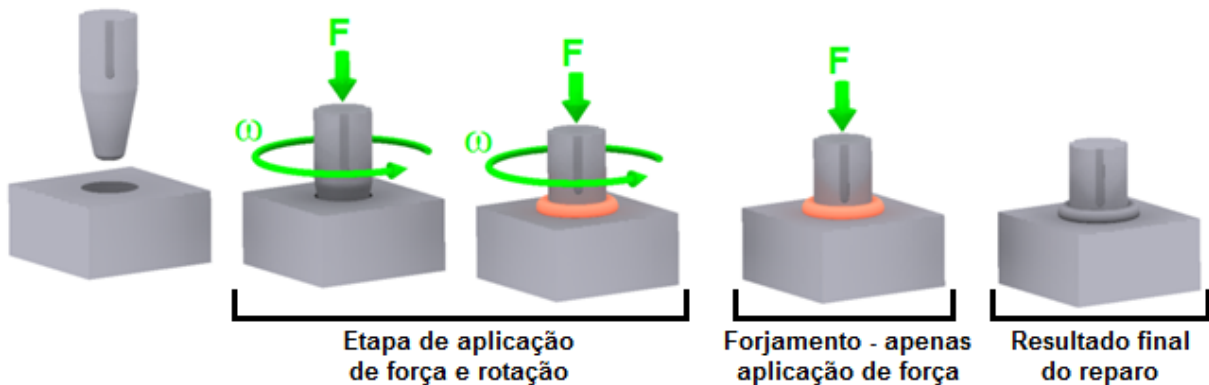


Figura 2.4 – Etapas executadas no processo de reparo por atrito

A opção de realizar o reparo com dois estágios foi desenvolvida em trabalhos anteriores para que, em um ensaio com uma força muito elevada, as chances de travamento fossem menores. Para isso, antes de ser aplicada a força de ensaio, é inserida uma etapa na qual é utilizada uma força menor. Como mencionado anteriormente, a maior chance de ocorrer o travamento está no início do ensaio. Assim, iniciando-se o ensaio com uma força menor e depois a aumentando, as chances de travamento são menores do que no caso de se já iniciar o ensaio com a força maior.

Assim, para a realização de um ensaio de reparo por atrito na UPPA3, devem ser informados os seguintes parâmetros: rotação, força e comprimento de queima do primeiro estágio, força e comprimento de queima do segundo estágio (apenas para o ensaio com dois estágios) e força e tempo de forjamento.

Considerando os melhores desempenhos da UPPA3 obtidos nos trabalhos de Borges (2011), Moura (2011) e Gontijo (2012), com o sistema de controle anterior, as faixas operacionais de força e rotação para os ensaios com um estágio eram respectivamente de 60 kN a 120 kN e de 1.400 a 1.700 rpm. Porém, Borges (2011) não obteve êxito na realização de quase todos os ensaios com força inicial igual a 100 kN devido ao travamento do sistema de rotação, mesmo esta última estando em seu valor máximo. Apesar disso, Gontijo (2012) conseguiu realizar ensaios com força até 120 kN sem que ocorresse o travamento. Uma diferença importante entre esses dois trabalhos é que no de Gontijo (2012) o comprimento de queima utilizado foi de 6 mm, enquanto que no de Borges (2011) o mínimo foi de 12 mm. Portanto, sabe-se que esse é um parâmetro importante na definição da faixa operacional do equipamento.

Com base nesses mesmos trabalhos, a maior força que pôde ser aplicada no segundo estágio foi de 250 kN, obtida por Borges (2011). Forças maiores não puderam ser atingidas por conta da resposta lenta do sistema de controle e, como no segundo estágio o material está aquecido, sua resistência é baixa, exigindo uma atuação mais rápida do controlador.

Para a etapa de forjamento, a força máxima do equipamento pode ser atingida facilmente, já que o material sofre uma redução de temperatura e conseqüentemente tem sua resistência aumentada, não exigindo uma resposta muito rápida do controlador para que a força aumente.

2.3. Identificação de Sistemas Dinâmicos

A identificação de sistemas objetiva construir modelos matemáticos para sistemas dinâmicos a partir de dados obtidos desses sistemas. As técnicas de identificação de sistemas têm uma ampla área de aplicação, já que sistemas dinâmicos estão presentes em grande escala na indústria.

Em um sistema dinâmico, variáveis interagem entre si produzindo sinais observáveis, os quais são denominados saídas. Um sistema também pode ser afetado por estímulos externos. Sinais externos que podem ser manipulados pelo observador são denominados entradas e os demais são distúrbios.

Existem modelos com várias formas e expressos com vários graus de formalismo matemático. O tipo de aplicação irá determinar o grau de sofisticação que é necessário para construir o modelo de um determinado sistema (LJUNG, 1999).

Apesar de muitas relações físicas serem representadas mediante equações lineares, na maior parte dos casos as relações reais não são verdadeiramente lineares. Na verdade, um estudo cuidadoso dos sistemas físicos revela que mesmo os classificados como “sistemas lineares” só os são em faixas de operação limitadas. Na prática, muitos sistemas eletromecânicos, hidráulicos e pneumáticos guardam relações não lineares nas suas variáveis. Por exemplo, a zona morta de um componente é uma faixa pequena de variações da entrada diante das quais o componente é insensível (OGATA, 1998).

Já alguns sistemas de controle são não-lineares para sinais de qualquer tamanho, como o controle ON/OFF, por exemplo. Nesse caso, é necessário introduzir os sistemas lineares

equivalentes em vez de modelos não-lineares, isso devido à dificuldade matemática associada a esse tipo de modelo.

Modelos matemáticos de sistemas dinâmicos podem ser desenvolvidos através de dois caminhos diferentes ou de uma combinação deles. Um desses caminhos consiste em dividir o sistema em subsistemas nos quais suas propriedades são conhecidas, e, posteriormente, unir matematicamente os subsistemas, obtendo assim o modelo matemático geral. Isso é conhecido como modelagem e não necessita de dados experimentais do sistema.

O outro caminho para o desenvolvimento de modelos matemáticos é através de experimentos. Assim, os dados de entrada e saída do sistema são coletados e submetidos à análise para que o modelo seja obtido. Isso é conhecido como identificação de sistemas.

Na prática os sistemas são diferentes de seus respectivos modelos matemáticos, porém esses modelos devem ser suficientemente úteis para sua descrição.

A construção de um modelo matemático de um sistema envolve três passos básicos:

- *Obtenção dos dados de entrada e saída do sistema:* esses dados devem ser obtidos durante um experimento de identificação desenvolvido especificamente de maneira a se obter o máximo de informações sobre o sistema. Isso é feito a partir da determinação de quando e quais sinais serão medidos e de como selecionar os sinais de entrada adequados para esse fim;
- *Determinação das estruturas matemáticas relacionadas ao sistema:* existe uma série de estruturas dentro das quais é necessário procurar a mais adequada. A definição da estrutura do modelo é com certeza o mais difícil e o mais importante passo na identificação de sistemas. Ela é baseada no entendimento do processo de identificação e no conhecimento prévio sobre o sistema a ser identificado. Aqui, a intuição, a compreensão e o conhecimento devem ser relacionados com as propriedades dos modelos para a definição dos modelos que podem ser adequados para o sistema;
- *Determinação do modelo mais adequado para o sistema:* dentre os modelos escolhidos na etapa anterior, é feita uma avaliação da qualidade. Essa avaliação é baseada no desempenho do modelo ao tentar reproduzir os dados obtidos no experimento de identificação. Para isso, é escolhido um critério de aproximação como, por exemplo, o método dos mínimos quadrados. Porém, no fim, quem deve tomar a decisão se o modelo é bom ou não é o próprio usuário. Segundo Draper e Smith (1981), “A seleção de variáveis nunca deve ser

deixada ao critério de qualquer procedimento estatístico”. É sempre bom verificar a validade do modelo através da plotagem de gráficos, mostrando, para uma mesma entrada, a resposta do modelo e a resposta do sistema real, podendo assim compará-las e saber até que ponto o modelo é eficiente.

Depois de determinado o modelo matemático, deve-se fazer a sua validação, ou seja, resta saber se esse modelo é bom o suficiente para representar o sistema. Isso é feito através de testes que envolvem vários procedimentos para avaliar como o modelo se relaciona com os dados observados, com o que se sabe do sistema e como se pretende usá-lo. Caso o modelo seja deficiente, ele é rejeitado e devem ser revisados novamente todos os passos.

Segundo Ljung (1999), um modelo pode ser deficiente por várias razões:

- O procedimento numérico falhou ao tentar encontrar o melhor modelo de acordo com o seu critério;
- O critério não foi bem escolhido;
- O modelo escolhido não era apropriado, na medida em que não contém uma descrição do sistema do tipo “boa o bastante”;
- Os dados coletados não foram informativos o suficiente para fornecer um direcionamento na seleção de bons modelos.

A maior parte dos processos em uma identificação consiste em direcionar esses problemas, em particular o terceiro, em um método iterativo guiado pela informação prévia sobre o sistema e resultados de tentativas anteriores. Um programa iterativo é obviamente uma importante ferramenta para manipular esse problema. Na Figura 2.5 é apresentado um fluxograma com os procedimentos que devem ser seguidos para a identificação de sistemas.

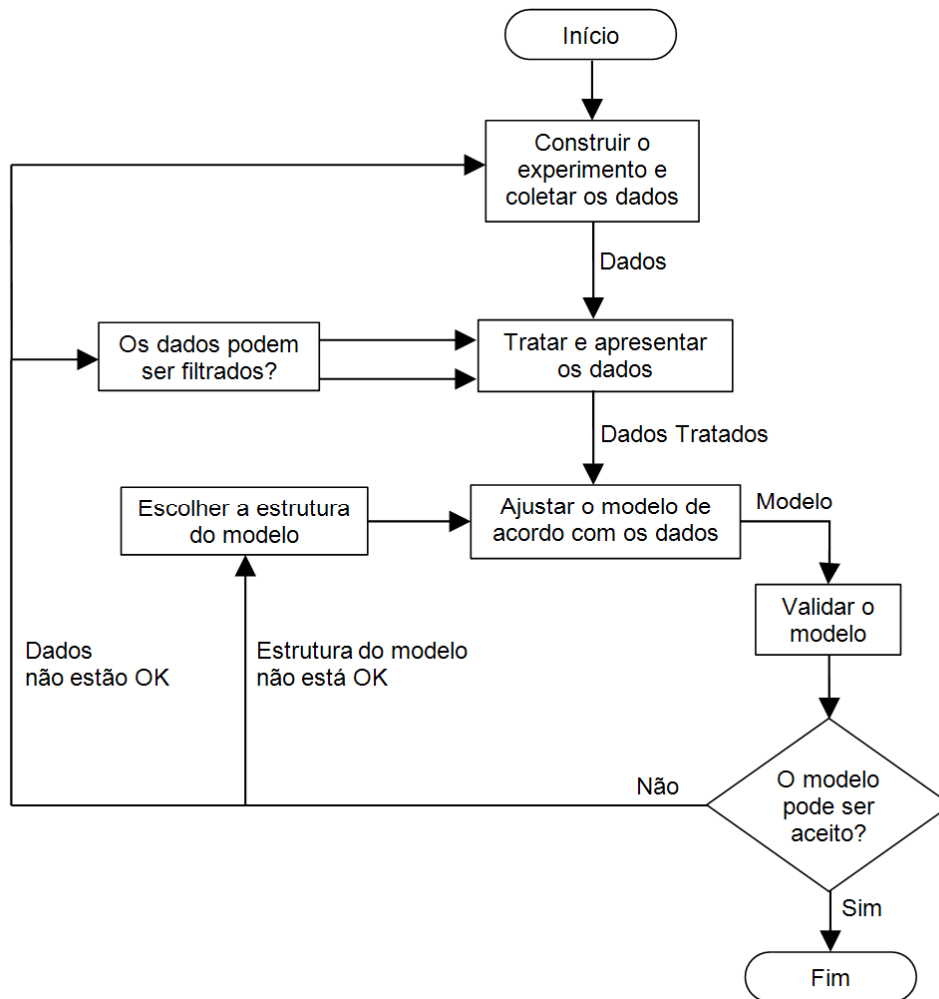


Figura 2.5 – Procedimento para a identificação de sistemas (LJUNG, 1999)

2.4. Controladores PID

Controladores são empregados em larga escala e de diferentes formas na indústria para o controle de sistemas em malha fechada. Eles têm como entrada o sinal de erro, que é a diferença entre o valor desejado e o valor medido no processo. Na Figura 2.6 é apresentado o esquema de um sistema de controle em malha fechada.

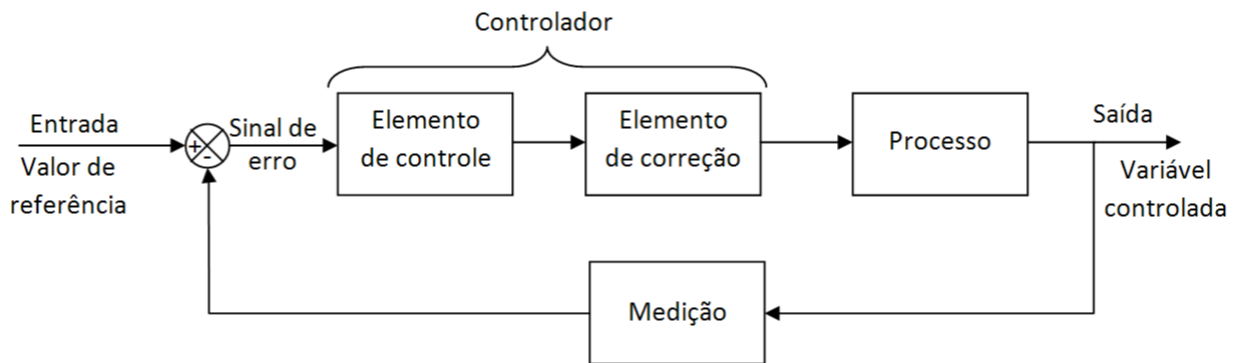


Figura 2.6 – Sistema de controle em malha fechada

De acordo com Bolton (1995), a relação entre saída e entrada do controlador PID é frequentemente denominada lei de controle, sendo que existem três formas desta lei: proporcional, integral e derivativa.

Controladores PID têm muitas funções importantes, tais como eliminar o erro em regime permanente através da ação integral e antecipar o futuro através da ação derivativa.

2.4.1. Algoritmo Básico

O algoritmo básico de um controlador PID é descrito pela equação 2.1, onde $u(t)$ é o sinal de controle e $e(t)$ é o sinal de erro (diferença entre entrada e saída).

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \right] \quad (2.1)$$

Como pode ser visto, o sinal de controle é a soma de três termos: proporcional, integral e derivativo. Os parâmetros do controlador são o ganho proporcional K_p , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d . Para representar os parâmetros do controlador PID em termos de K_p , K_i e K_d , é utilizada a seguinte relação: $K_i = K_p/T_i$ e $K_d = K_p T_d$. Assim, a função de transferência do controlador PID em função desses termos é apresentada na equação 2.2.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.2)$$

Maiores detalhes sobre a construção e ação de cada um dos termos do controlador PID podem ser encontrados nos trabalhos de Campestrini (2006), Nicula (2010), Freitas (2011) e Astrom e Hagglund (1995).

Para sua utilização em sistemas de controle digitais, como, por exemplo, num CLP, é necessário discretizar o controlador PID analógico. Para isso, é necessário aproximar as partes derivativa e integral que aparecem na lei de controle. O algoritmo do controlador PID digital presente no CLP da Siemens, modelo S7-200, utilizado no desenvolvimento deste trabalho, é mostrado na equação 2.3, onde T_s é o tempo de amostragem (SIEMENS AG, 2008). Nesse caso, pode ser observado que tanto a parte integral quanto a parte derivativa foram aproximadas utilizando o método “*backward differences*”. Mais detalhes sobre este e outros métodos de aproximação podem ser encontrados em Astrom e Hagglund (1995).

$$u(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right] \quad (2.3)$$

2.4.2. Ajuste pelo Método da Tentativa

Para fazer adequadamente o ajuste de um sistema de controle é necessário o conhecimento da dinâmica do processo a ser controlado. Para isso, é preciso levantar o máximo de informações possível à seu respeito. Tais informações podem variar desde simples características do processo até um modelo matemático complexo do mesmo.

Logo em seguida, é necessário definir os critérios de desempenho requeridos para o sistema. Esses critérios podem ser, por exemplo, o menor valor possível de *overshoot*, o tempo de subida e o tempo de acomodação ou *settling time*.

A seguir, na Figura 2.7 é apresentado um exemplo de resposta dinâmica de uma malha de controle onde podem ser observados o *overshoot* (A/B), o tempo de subida (T_s), o tempo de acomodação (T_A) e o erro em regime permanente, que é especificado de acordo com o projeto e obtido a partir do erro em relação ao valor de *setpoint* (SP).

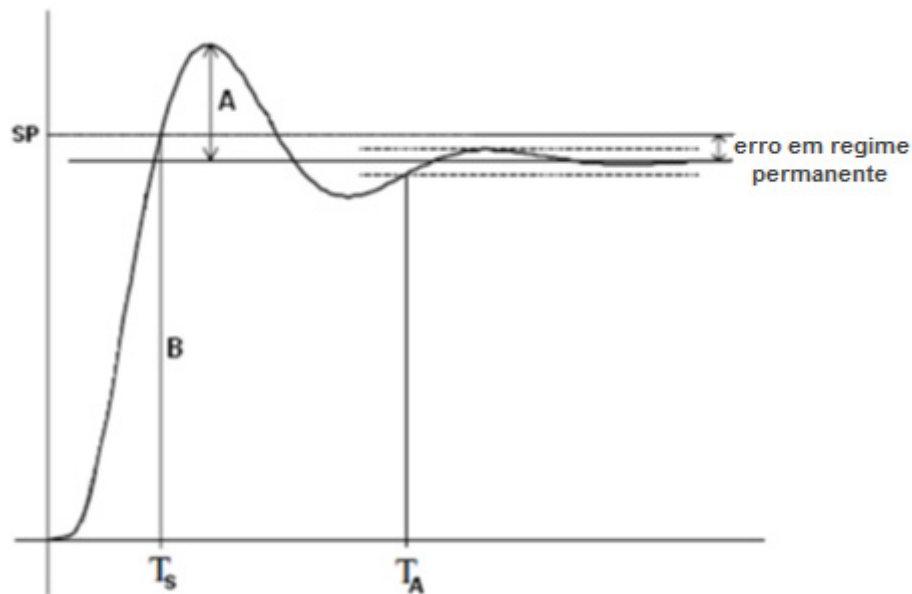


Figura 2.7 – Resposta dinâmica de uma malha de controle (NICULA, 2010)

O ajuste de controladores PID baseia-se no acerto ou sintonia das ações proporcional, integral e derivativa. Existem diversos métodos de ajuste de controladores PID, sendo um deles o método de aproximações sucessivas ou por tentativa, que é um dos mais utilizados devido à sua simplicidade (NICULA, 2010). Esse método consiste em modificar as ações de controle e observar o efeito na variável de processo até que se obtenha uma resposta ótima. Os passos para o ajuste de um controlador PID pelo método da tentativa são os seguintes:

1. Eliminar as ações integral e derivativa, fazendo-se $T_i = \infty$ e $T_d = 0$;
2. Estabelecer um *setpoint*, ajustar o ganho K_p em um valor baixo e acionar o sistema de controle;
3. Aumentar o valor de K_p até o processo obter uma resposta oscilatória com amplitude constante;
4. Reduzir o valor de K_p à metade;
5. Diminuir T_i aos poucos até o processo oscilar continuamente e, em seguida, ajustá-lo para três vezes o valor obtido;
6. Aumentar T_d lentamente até o processo oscilar continuamente e, em seguida, ajustá-lo para um terço do valor obtido.

Uma das desvantagens do método da tentativa é que seu uso torna-se impraticável em processos de grande inércia devido à necessidade de um tempo elevado para se conseguir o ajuste. Além disso, para utilizá-lo é necessário conhecer muito bem o processo.

Outro fator importante é que obter uma oscilação contínua pode ser uma tarefa difícil, já que ela se encontra no limite de estabilidade e qualquer perturbação ou alteração no processo pode causar uma operação instável e até mesmo perigosa.

2.5. Redes Neurais Artificiais

A técnica da inteligência artificial que é baseada na organização e arquitetura elementar do cérebro é conhecida como Redes Neurais Artificiais (RNAs). Analogamente ao cérebro biológico, as RNAs são formadas por um número individual de unidades (neurônios artificiais) que se interconectam uns aos outros, formando redes capazes de armazenar e transmitir informações vindas do exterior.

A grande motivação no uso de RNAs é a sua capacidade de aprender através de exemplos. O desenvolvimento das RNAs busca modelar os circuitos do cérebro de maneira a obter um comportamento inteligente, de tal forma que elas possam ir aprendendo novas tarefas, com os próprios erros e acertos, e fazendo generalizações e descobertas. Estes circuitos neurais artificiais têm ainda a capacidade de se auto-organizar quando submetidos a ambientes diversos, criando suas próprias representações internas. Com isso, podem apresentar comportamentos imprevisíveis e que não podem ser compreendidos, assim como não são compreendidos os mecanismos do próprio cérebro biológico (BARRETO, 1997).

O primeiro modelamento matemático de um neurônio biológico foi realizado por McCulloch e Pitts (1943). Já o primeiro método de treinamento de redes neurais artificiais foi apresentado por Hebb (1949). A partir de então, foram desenvolvidos vários trabalhos com o objetivo de aprimorar a técnica, onde foram obtidas diferentes estruturas e métodos de treinamento das RNAs (ROSENBLATT, 1958; WIDROW; HOFF, 1960; RUMELHART; HINTON; WILLIAMS, 1986).

O neurônio artificial modelado por McCulloch e Pitts (1943) é mostrado na Figura 2.8, onde o conjunto de sinapses é formado pelas entradas x_j e seus respectivos pesos sinápticos w_j . Já a saída é o resultado da aplicação de uma função, denominada “função de ativação”, à soma das entradas combinadas com seus respectivos pesos.

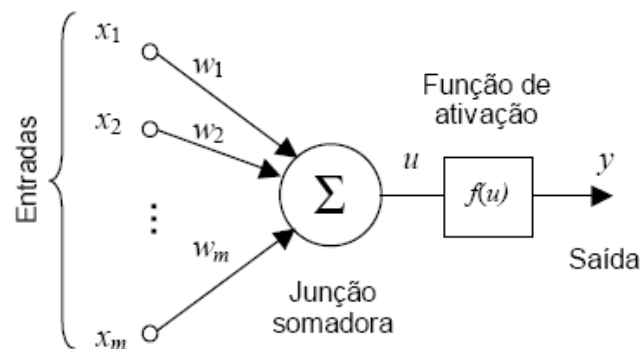


Figura 2.8 – Neurônio artificial modelado por McCulloch e Pitts

De acordo com Haykin (1999), uma RNA é um sistema massivamente paralelo e distribuído, composto por unidades de processamento simples (os neurônios artificiais) que possuem uma capacidade natural de armazenar e utilizar o conhecimento. Os neurônios artificiais podem ser combinados de diferentes formas em uma rede neural. Um exemplo é mostrado na Figura 2.9.

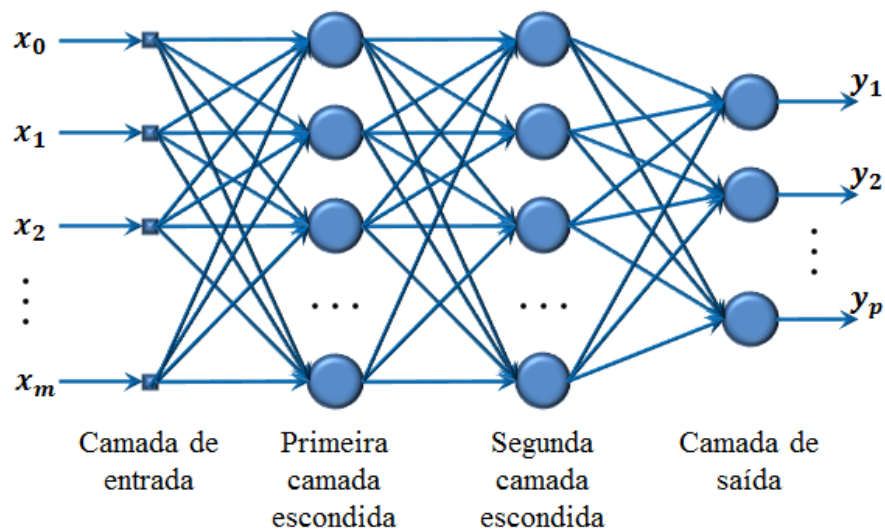


Figura 2.9 – Rede neural direta com duas camadas escondidas

Sob o ponto de vista de controle, um neurônio artificial “*i*” pode ser estruturado conforme a Figura 2.10, onde $y_1 \dots y_n$ são valores passados das saídas do sistema, $x_1 \dots x_m$ são valores passados das entradas do sistema, caracterizando “*n*” autoregressores e “*m*” regressores exógenos, e w_{ib} é o *bias* associado ao neurônio, o que é equivalente a um valor de

“offset” do mesmo. Ainda na Figura 2.10, $H(s)$ é um sistema dinâmico linear SISO (*Single Input Single Output*) e $f(u)$ é a função de ativação que pode ser, por exemplo, degrau, sigmoide ou gaussiana.

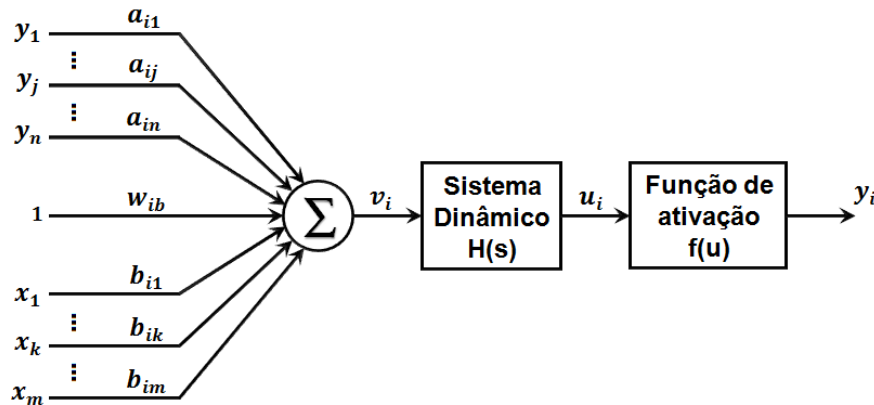


Figura 2.10 – Estrutura do neurônio artificial sob o ponto de vista de controle (adaptado de SCHNITMAN, 1998)

A obtenção do valor de v_i é feita a partir da soma das entradas do neurônio combinadas com seus respectivos pesos, conforme descrito na equação 2.4.

$$v_i(t) = w_{ib}(t) + \sum_{j=1}^N a_{ij} \times y_j(t) + \sum_{k=1}^M b_{ik} \times x_k(t) \quad (2.4)$$

Um estudo mais aprofundado sobre as diferentes estruturas de RNAs, métodos de treinamento e sua utilização no controle de sistemas dinâmicos pode ser encontrado nos trabalhos de Haykin (1999), Schnitman (1998), Brown e Harris (1994) e Hunt *et al.* (1992).

2.6. Algoritmos Genéticos (AGs)

Desde a década de 1960 tem havido um interesse crescente em imitar os seres vivos na busca pelo desenvolvimento de algoritmos poderosos para aplicação em problemas de otimização complexos, sendo que tais técnicas fazem parte do que pode ser denominado como “computação evolutiva” (GEN; CHENG, 2000). Os AGs foram propostos originalmente por John Holland (1975). Uma das vantagens de sua utilização é que, na busca pela solução de um

problema de otimização, eles podem encontrar o mínimo global com alta probabilidade (RAO, 2009).

A utilização de técnicas de inteligência artificial na área de controle é bastante difundida. Algoritmos genéticos (AGs) são algoritmos matemáticos inspirados nos mecanismos de evolução natural e recombinação genética (GOLDBERG, 1989). Eles fornecem um mecanismo de busca adaptativa baseada na teoria da evolução, a qual define o ciclo de reprodução, mutação e sobrevivência dos mais aptos (seleção natural).

O AG busca a solução de um problema através da submissão de uma população de indivíduos que são candidatos a soluções desse problema a um processo de evolução (seleção, reprodução e mutação) por vários ciclos (ou gerações). Esses indivíduos são representados por cromossomos, cada um associado a uma aptidão (desempenho de cada indivíduo na solução do problema), o que irá definir o mecanismo de seleção.

A sequência das operações básicas de um AG é mostrada no fluxograma da Figura 2.11.

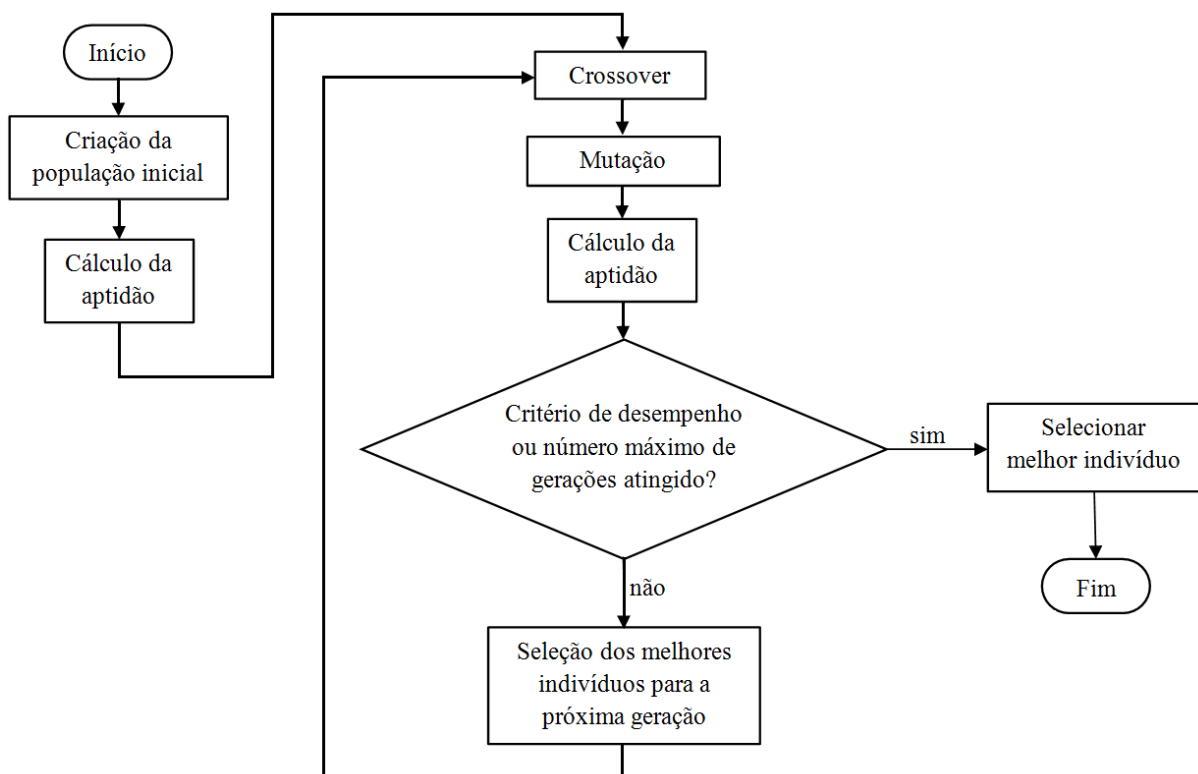


Figura 2.11 – Operações básicas de um AG

A etapa inicial do desenvolvimento de um AG é a determinação da estrutura de cada indivíduo da população, ou seja, a estrutura das possíveis soluções. Para isso, deve-se conhecer o formato da solução do problema. As representações dos indivíduos podem ser de diversos tipos como, por exemplo, um vetor de números reais. Dessa forma, o espaço de busca do AG é o conjunto de todas as possíveis configurações desse indivíduo.

A população inicial contém as primeiras propostas de solução do problema geradas de forma aleatória, e ela pode ser gerada de três formas: determinística, aleatória ou mista (RODRIGUES, 2011).

O cálculo da aptidão dos indivíduos é realizado através de uma função de avaliação. A função de avaliação pode ser, por exemplo, uma função de máximo ou de mínimo. Assim, a aptidão está relacionada com o resultado obtido quando o indivíduo é testado nessa função. Essa função indicará o quanto cada indivíduo da população está próximo da melhor solução para o problema, sendo que esse procedimento é realizado para todos os indivíduos.

O processo de seleção consiste em selecionar um determinado número de indivíduos para a próxima geração e, posteriormente, selecionar os pares para o *crossover* de acordo com um método que privilegie os de melhor aptidão. Dentre os vários métodos de seleção existentes, a seguir são descritos dois:

- **Truncamento:** todos os indivíduos são ordenados de acordo com a aptidão, do de maior para o de menor, ou seja, o primeiro deve ser o de maior aptidão. Em seguida, selecionam-se os N primeiros indivíduos, sendo que N é o número de indivíduos que se deseja selecionar. No caso da seleção dos indivíduos para a próxima geração, esse método também pode ser definido como “reinscrição ordenada”;
- **Ranking:** como no método anterior, o primeiro passo é ordenar todos os indivíduos de acordo com a aptidão. Depois disso, para cada indivíduo, são dadas “fichas” numeradas, sendo que o número de “fichas” que cada indivíduo recebe é diretamente proporcional à sua aptidão. Assim quanto maior a aptidão, maior é o número de “fichas” que o indivíduo recebe. Depois disso, são feitos N sorteios entre essas “fichas”, e os detentores das “fichas” sorteadas são selecionados. Assim, um indivíduo pode ser selecionado mais de uma vez, pois além do indivíduo poder ter mais que uma ficha, a cada sorteio a “ficha” retorna, tendo a chance de ser sorteada novamente. Dessa forma, probabilidade de um indivíduo ser sorteado depende unicamente da sua aptidão.

A diferença entre os métodos de seleção é o que é denominado pressão seletiva. Quanto maior a chance de os indivíduos com maior aptidão serem sorteados, maior é a pressão seletiva. Quanto maior a pressão seletiva, menor será o número de gerações necessárias para se chegar à solução, porém maior será o risco de convergência prematura, ou seja, maior é o risco de o AG convergir para um mínimo local.

Durante a seleção para o *crossover*, os indivíduos são agrupados em pares, sendo que na maioria dos casos, cada par de pais dá origem a um par de filhos. O *crossover* (recombinação) consiste na combinação dos genes dos indivíduos selecionados gerando novos indivíduos. Os métodos de *crossover* possibilitam a recombinação desses pais a fim de transmitir suas características para a próxima geração. O *crossover* depende da forma do cromossomo (indivíduo).

Para um indivíduo na forma de vetor de números reais, pode ser utilizado, por exemplo, a recombinação intermediária. A Figura 2.12 exemplifica esse tipo de *crossover*, onde as máscaras são vetores de números reais, indicados por α_1 e α_2 , sorteados aleatoriamente dentro de um intervalo pré-determinado. A diversidade dos filhos é controlada pelo intervalo de sorteio dos pesos α .

Pai 1:	10	16	8	α_1 :	0,3	0,5	-0,1
Pai 2:	15	7	21	α_2 :	1,1	0,2	0,6

Filho 1 = Pai1 + $\alpha_1 \times (Pai2 - Pai1)$

Filho 1:	$10 + 0,3 \times (15 - 10)$	$16 + 0,5 \times (7 - 16)$	$8 - 0,1 \times (21 - 8)$
----------	-----------------------------	----------------------------	---------------------------

Filho 1:	11,5	11,5	-6,7	De forma análoga:	Filho 2:	15,5	14,2	15,8
----------	------	------	------	-------------------	----------	------	------	------

Figura 2.12 – Exemplo de *crossover* a partir do método de recombinação intermediária

A mutação tem o objetivo de introduzir e manter a diversidade da população, alterando aleatoriamente um ou mais genes de uma parcela dos filhos gerados no *crossover*, e o método utilizado para realizá-la também depende do tipo de cromossomo. Para vetores reais, por exemplo, pode-se sortear uma posição desse vetor e multiplicar o valor correspondente por um número aleatório dentro de um intervalo pré-definido.

Apesar de aleatórios, AGs são mecanismos de busca direcionados, pois exploram informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos (RODRIGUES, 2011).

As principais vantagens dos AGs são: técnica de busca global, viabiliza a otimização de problemas mal estruturados e dispensa a formulação matemática precisa do problema. Esta técnica é robusta e aplicável a uma grande diversidade de problemas e, para muitos deles, é capaz de encontrar soluções sub-ótimas, inclusive ótimas, em um tempo razoável.

Em contrapartida, as principais desvantagens dos AGs são: dificuldade para achar o ótimo global exato, requerem um grande número de avaliações das funções de aptidão e suas restrições e grandes possibilidades de configurações podendo complicar a resolução.

Os parâmetros de desempenho de um AG são as variáveis que devem ser definidas para a sua construção, os quais são: tipo de cromossomo, quantidade de indivíduos da população total, quantidade de indivíduos selecionados a cada geração, métodos de seleção para próxima geração e para o *crossover*, tipos de *crossover* e de mutação, número de filhos por geração e quantidade de filhos que sofrerão mutação.

Esses parâmetros devem ser analisados através de testes de forma a encontrar a melhor configuração para o AG de acordo com o problema a ser resolvido, evitando convergência prematura, que resulta no risco de não encontrar respostas satisfatórias, ou, por outro lado, esforço computacional desnecessário. Rezende (2005) cita a influência desses parâmetros no comportamento do AG.

Maiores detalhes a respeito das possíveis estruturas para os AGs, suas aplicações, métodos de seleção, *crossover* e mutação e ajuste dos parâmetros de desempenho podem ser encontrados nos trabalhos de Rezende (2005), Gen e Cheng (2000), Goldberg (1989) e Rao (2009).

2.7. Lógica Fuzzy

Baseada na Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e proposta em 1965, nos Estados Unidos, foi utilizado pela primeira vez o termo “lógica *fuzzy*”, em uma publicação feita por Lotfi A. Zadeh (MALUTTA, 2004).

A tradução do termo em inglês “*fuzzy*” tem o significado como algo vago, indefinido ou incerto. Na área de inteligência artificial, os termos mais utilizados são nebuloso ou difuso. A lógica *fuzzy* trata de um raciocínio que classifica em números uma determinada realidade ou situação que trabalha com muitas variáveis incertas e vagas, objetivando viabilizar e facilitar o trabalho ou manipulação dessa realidade pelos computadores (SHAW, 1999).

Para ter uma idéia básica do que é a lógica *fuzzy*, pode-se considerar o exemplo da classificação de cestas de maçãs e laranjas de McNeill e Thro (1994). De acordo com a lógica clássica, existe a classificação de apenas dois tipos de cestas: as de maçãs e as de laranjas. Caso existir uma cesta com maçãs e laranjas misturadas, de acordo com a lógica clássica existe apenas duas possibilidades de classificação dessa cesta, ou ela é uma cesta de maçãs ou ela não é uma cesta de maçãs. As opções são simplesmente “sim” e “não”. A vantagem da lógica *fuzzy* é que ela permite opções intermediárias de classificação das cestas. Dessa forma, a classificação da cesta com relação às maçãs não estará restrita às opções “sim” e “não”, mas poderão existir também opções intermediárias como “quase”, “mais ou menos”, “um pouco”.

Assim, essa técnica busca imitar o pensamento humano que é nebuloso por natureza. Ela consiste em basicamente determinar um conjunto de regras, que varia dependendo do problema, e então coletar os dados, analisá-los de acordo com as regras implementadas e aproximá-los por números para possibilitar a interpretação das máquinas e computadores. A lógica *fuzzy* é uma tecnologia padrão, aplicada na área de desenvolvimento industrial, ciências ambientais e até mesmo na área de negócios e finanças (KOHAGURA, 2007).

2.6.1. Conjuntos Fuzzy

Como mencionado anteriormente, a lógica *fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, que diz que dado um determinado elemento que pertence a um domínio, é verificado o seu grau de pertinência em relação a esse domínio. O grau de pertinência informa o quanto um determinado elemento pertence a um conjunto; portanto é um valor real que varia entre 0 (não pertence) e 1 (pertence completamente).

Enquanto na lógica clássica o grau de pertinência é binário, ou seja, pertence ou não pertence, na lógica *fuzzy* ele pode assumir qualquer valor entre 0 e 1.

2.6.2. Funções de Pertinência

Os conjuntos *fuzzy* são caracterizados pelas suas funções de pertinência. Existem diferentes tipos de funções de pertinência, que são determinadas de acordo com a aplicação e a maneira de representar um determinado contexto. Elas podem ser do tipo triangular, trapezoidal, gaussiana, Cauchy, sigmoide, etc. Na Figura 2.13 é apresentada a função de pertinência do tipo gaussiana, que tem sua fórmula descrita pela equação 2.5.

$$\mu_{\text{gauss}}(x; a, b) = e^{-\frac{(x-a)^2}{b}} \quad (2.5)$$

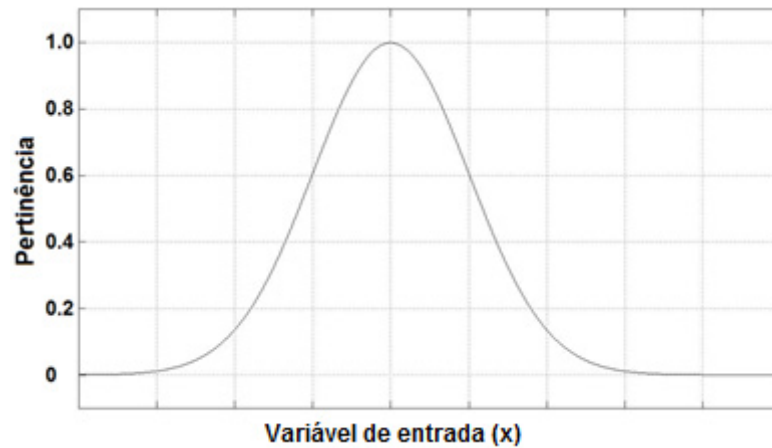


Figura 2.13 – Função de pertinência Gaussiana

2.6.3. Raciocínio Fuzzy

O raciocínio fuzzy é composto de por três etapas que fecham um ciclo, que são a *fuzzificação*, a inferência e a *defuzzificação*, conforme Figura 2.14.

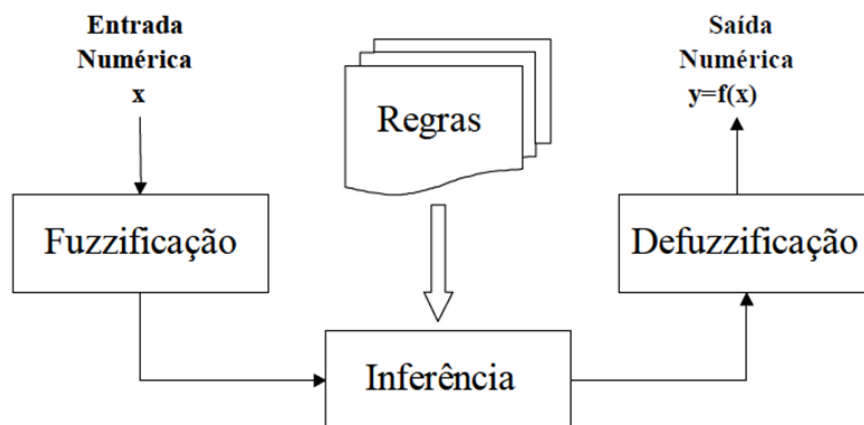


Figura 2.14 – Raciocínio *fuzzy*

A *fuzzificação* é o primeiro passo do raciocínio *fuzzy*, e consiste em transformar um dado numérico em um termo de linguagem natural. No dia-a-dia, a *fuzzificação* se encontra presente, por exemplo, no momento em que um aluno diz que a matéria da prova está “muito grande” por corresponder a 100 páginas do livro, ou um professor diz que um aluno teve uma

nota “péssima” por ter tirado uma nota de 25% na prova. Essas são *fuzzificações* realizadas pelo aluno e pelo professor.

Assim, para realizar a *fuzzificação* de um determinado dado numérico, são utilizadas as funções de pertinência, que verificam o quanto esse dado pertence a um determinado conjunto *fuzzy* (ou classificação). Dessa maneira, são obtidos os graus de pertinência entre 0 e 1 para cada conjunto a partir dos valores de entrada. Cada valor de entrada está associado a uma variável de entrada que pode conter vários conjuntos, ou seja, várias funções de pertinência.

A inferência é a etapa do raciocínio *fuzzy* através da qual é feita a tomada de decisão. Depois de determinados os graus de pertinência de cada conjunto, com os dados resultantes são aplicadas regras do tipo “se-então”, realizando o mapeamento para novos conjuntos. Por exemplo, uma regra pode ser construída da seguinte forma: se o “resultado sobre vendas” (variável de entrada) é “ótimo” (conjunto pertencente à variável “resultado sobre vendas”) e o “endividamento” (variável de entrada) é “baixo” (conjunto pertencente à variável “endividamento”), então o “balanço” (variável de saída) é “favorável” (conjunto pertencente à variável “balanço”).

Para obter uma relação, deve-se determinar o tipo de operação de implicação *fuzzy*. Existem vários tipos de operadores de implicação, como “OU”, “E”, aritmético, *booleano*, drástico, etc. Por exemplo, o resultado do operador “OU” é o maior grau de pertinência entre os envolvidos na operação, enquanto o resultado do operador “E” é o menor grau de pertinência dentre os envolvidos. O resultado da operação é o dado de saída da relação de implicação.

Pode acontecer de, para um mesmo conjunto de saída *fuzzy*, serem obtidos resultados em duas regras diferentes. Nesse caso, uma das possibilidades é optar pelo resultado com maior valor.

A *defuzzificação* é a última etapa do raciocínio *fuzzy* e corresponde ao inverso da *fuzzificação*, ou seja, ao invés de transformar um dado quantitativo em um termo nebuloso, esta etapa transforma o dado nebuloso em dado quantitativo.

Quando um aluno recebe do professor a notícia que sua nota foi “péssima”, logo o aluno percebe que sua nota foi 30% ou menos. Existem diversos métodos de *defuzzificação*, sendo que deve ser escolhido aquele que melhor se adequa às características do problema. De acordo com Kohagura (2007), os três principais métodos de *defuzzificação* são o do centroide, do centro das somas e da média dos máximos.

O método do centroide, por exemplo, consiste em calcular o centroide do gráfico obtido na inferência. Considerando um gráfico com todas as funções de pertinência da variável de saída, deve-se cortar a área acima dos valores obtidos como resultado a partir da inferência para cada função de pertinência e então calcular o centroide da figura geométrica obtida, conforme exemplificado na Figura 2.15.

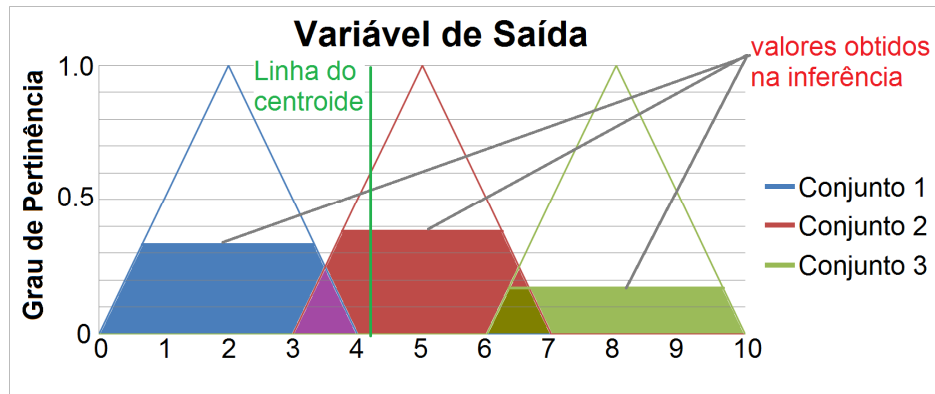


Figura 2.15 – Defuzzificação pelo método do centroide

A partir desses métodos, é finalizado o raciocínio *fuzzy*. Existem diversos modelos *fuzzy* prontos, que descrevem detalhadamente como devem ser as funções de pertinência de entrada e saída, e como deve ser realizada a inferência e a *defuzzificação*. Os mais utilizados são o modelo de Mamdani e o modelo de Takagi-Sugeno-Kang. Um estudo mais aprofundado da lógica *fuzzy* pode ser obtido a partir dos trabalhos de Kohagura (2007), McNeill e Thro (1994) e Shaw (1999).

CAPÍTULO III

Aspectos Construtivos da Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 (UPPA3)

Como mencionado anteriormente, para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizada a UPPA3. Nesse contexto, neste capítulo são descritos os aspectos construtivos da UPPA3 sob o ponto de vista tanto do sistema hidráulico, responsável pelo acionamento do equipamento, quanto da instrumentação, controle e aquisição de dados.

3.1 Sistema Hidráulico

A UPPA3 possui um sistema hidráulico que é responsável por gerar a força de compressão e a rotação do pino durante o processo de reparo por atrito. Para isso, esse sistema é composto por um cilindro e um motor hidráulicos, indicados na Figura 3.1.

A aplicação de força durante o reparo é realizada a partir do cilindro hidráulico, que é controlado por uma válvula direcional proporcional, conforme ilustrado na Figura 3.2. A pressurização da linha contendo o cilindro e a válvula é realizada a partir de um sistema hidráulico que possui uma bomba de pistão axial acionada por um motor elétrico. A pressão da linha está ajustada de forma que a força máxima que pode ser atingida na haste do cilindro é de 400 kN.

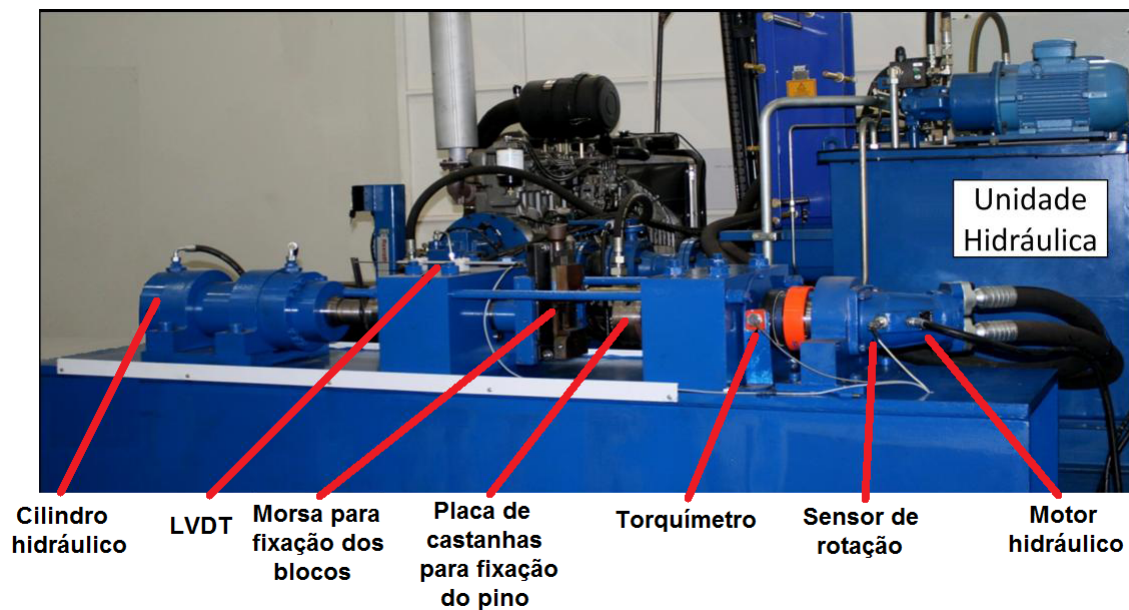


Figura 3.1 – Unidade de Processamento de Pinos por Atrito 3 - UPPA3 (adaptado de GONTIJO, 2012)

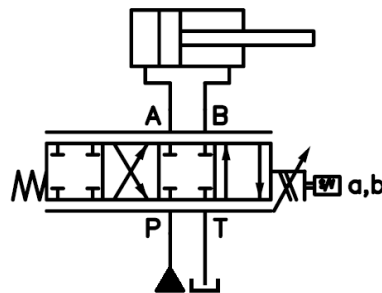


Figura 3.2 – Sistema hidráulico de aplicação de força da UPPA3

A rotação do pino durante o reparo é realizada a partir do motor hidráulico, que também é controlado por uma válvula direcional proporcional, conforme ilustrado na Figura 3.3. A pressurização da linha, nesse caso, é realizada a partir de um sistema hidráulico que contém uma bomba de pistão axial de vazão variável, acionada por um motor diesel. A pressão máxima ajustada na linha é de 310 bar, o que é capaz de gerar no eixo do motor hidráulico um torque de aproximadamente 616 N.m. A vazão máxima da bomba permite uma rotação máxima do eixo do motor hidráulico de 1.750 rpm sem que haja queda significativa de pressão na linha.

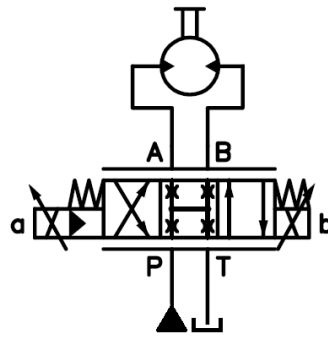


Figura 3.3 – Sistema hidráulico de rotação da UPPA3

3.2 Instrumentação, Controle e Aquisição de Dados

Os parâmetros adquiridos durante o processo de reparo por atrito são: força, rotação, comprimento de queima do pino e torque.

A linha hidráulica do sistema de força da UPPA3 contém dois sensores de pressão para a medição dessa grandeza nas duas câmaras do cilindro. Assim, através desses valores de pressão é obtido o valor da força aplicada na haste do cilindro.

A posição da haste do cilindro é obtida a partir de um sensor do tipo LVDT (*linear variable differential transformer*). Dessa forma, através do valor de posição é medido o comprimento de queima durante o reparo.

O motor hidráulico da UPPA3 possui internamente uma roda dentada, constituída de material ferromagnético, e um sensor de efeito Hall. Assim, a rotação é obtida a partir da frequência de pulsos gerados por esse sensor quando o motor hidráulico é acionado.

Um sensor de torque com comunicação por radiofrequência, acoplado ao eixo do motor hidráulico, é responsável pela medição dessa grandeza durante o reparo. A incerteza de medição desse sensor é de 50 N.m.

Na Figura 3.1 e na Figura 3.4 são apresentados como estão dispostos os sensores de rotação, torque e posição na UPPA3.

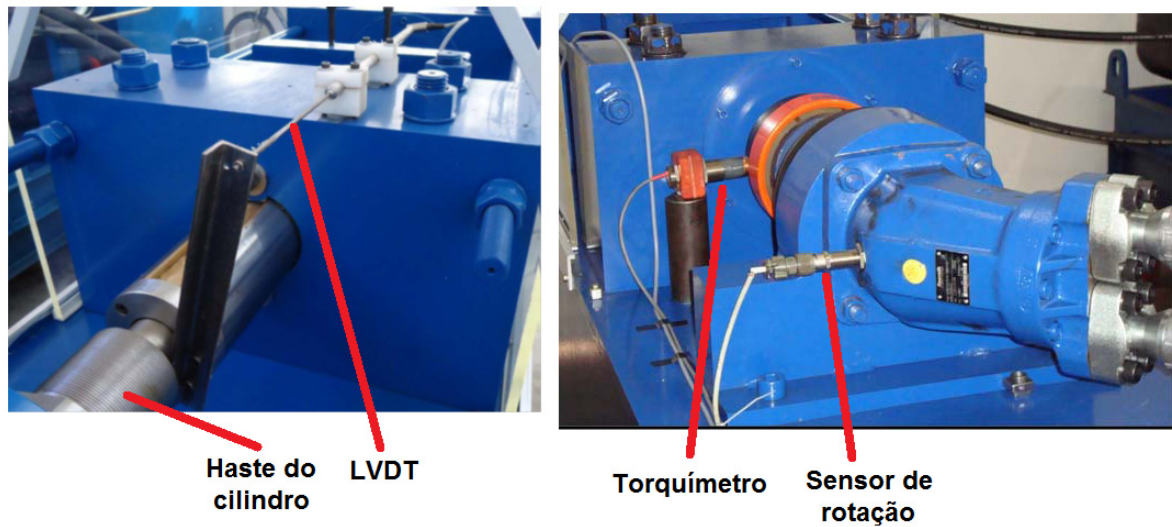


Figura 3.4 – Sensores de rotação, torque e posição da UPPA3 (adaptado de BORGES, 2011)

A aquisição dos valores medidos pelos sensores é realizada a partir de um CLP (Controlador Lógico Programável) da Siemens, modelo S7-200. Os dados adquiridos pelo CLP são transferidos para um computador onde está situado o programa supervisor, que foi desenvolvido utilizando o *software* Labview®. Esse programa é responsável pela interface com o usuário e pelo salvamento dos dados. A comunicação entre o computador e o CLP é serial, estabelecida através de um conversor RS-485/USB, e utiliza o padrão OPC (*OLE for Process Control*) para a interface com o programa supervisor. Além disso, a UPPA3 conta ainda com uma IHM (Interface Homem-Máquina) para interface com o operador. Na Figura 3.5 pode-se ter uma visão geral do sistema de aquisição de dados da UPPA3.

Os parâmetros que devem ser controlados durante o processo de reparo por atrito são dois: força e rotação. A força aplicada no pino é controlada a partir da válvula direcional proporcional responsável pelo acionamento do cilindro hidráulico. Já a rotação é controlada pela válvula direcional proporcional responsável pelo acionamento do motor hidráulico.

Originalmente o controle dessas válvulas é realizado a partir de cartões PID, porém, já que a proposta deste trabalho inclui a reestruturação do sistema de controle, maiores detalhes a respeito desse sistema serão descritos no próximo capítulo.

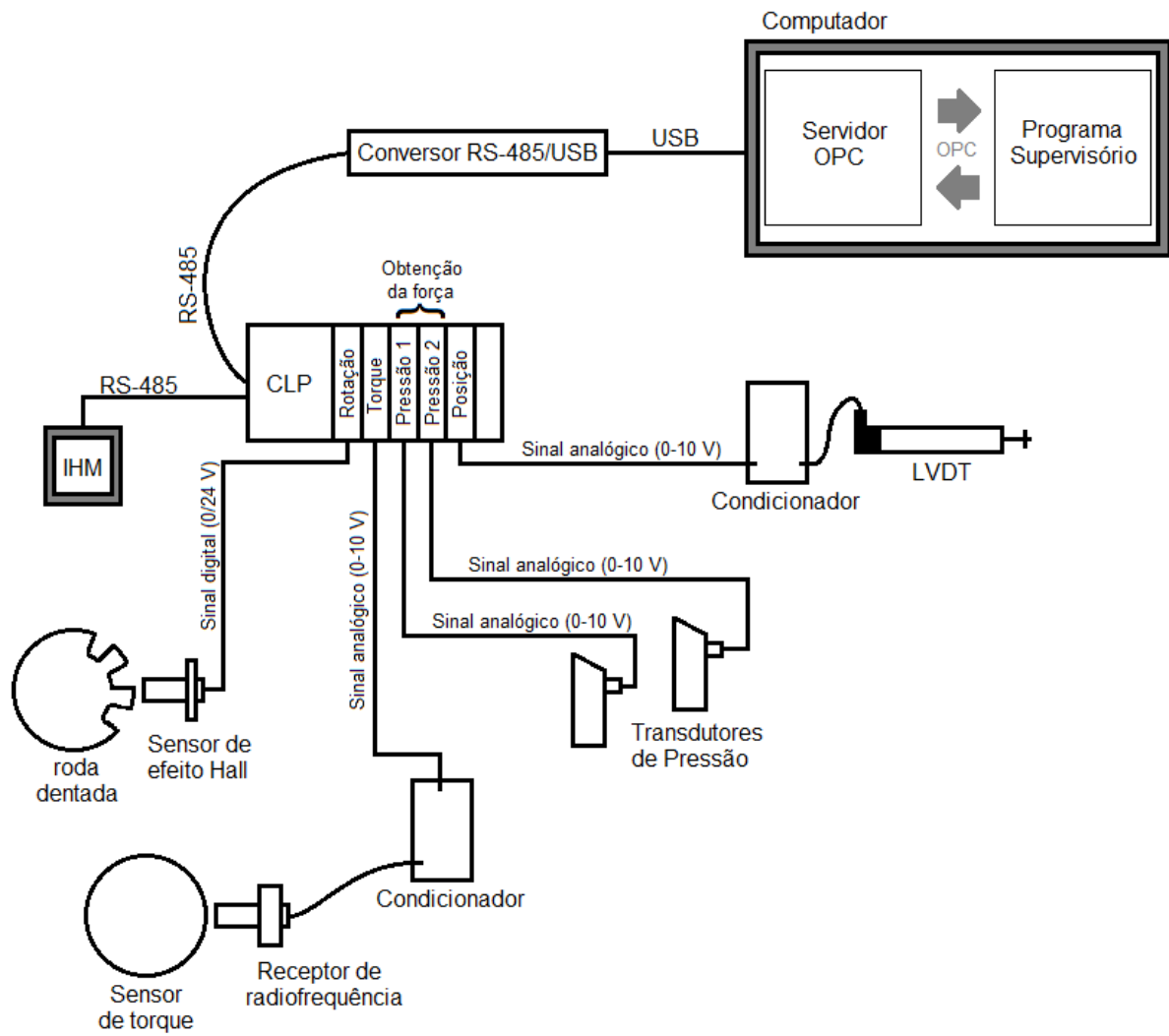


Figura 3.5 – Visão geral do sistema de aquisição de dados da UPPA3

CAPÍTULO IV

Projeto, Ajuste e Teste do Novo Sistema de Controle da UPPA3

Neste capítulo são descritos o processo de reestruturação do sistema de controle da UPPA3, a construção do algoritmo genético (AG), o desenvolvimento do sistema antitravamento e os métodos de controle empregados nos sistemas de força e rotação. Por fim, é feita a descrição do procedimento adotado para a realização dos ensaios de reparo por atrito para a validação do novo sistema de controle implementado.

As etapas executadas no desenvolvimento desse trabalho e que são descritas neste capítulo são as seguintes: reestruturação do sistema de controle, desenvolvimento do algoritmo genético, controle de força (identificação da planta e ajuste do controlador), controle de rotação (identificação da planta e projeto e ajuste do controlador), sistema antitravamento (projeto) e realização de ensaios de reparo por atrito.

4.1. Reestruturação do Sistema de Controle

Os sistemas de controle de força e rotação da UPPA3 foram originalmente estruturados conforme descrito na Figura 4.1. Pode ser observado que o controle de força era realizado a partir de um cartão PID analógico, e o de rotação, a partir de um cartão PID digital. Os *setpoints* de força e rotação, que fazem parte dos parâmetros de entrada do usuário para a realização dos ensaios, eram enviados ao CLP para que este transformasse os valores numéricos em sinais analógicos que pudessem ser lidos pelos cartões PID.

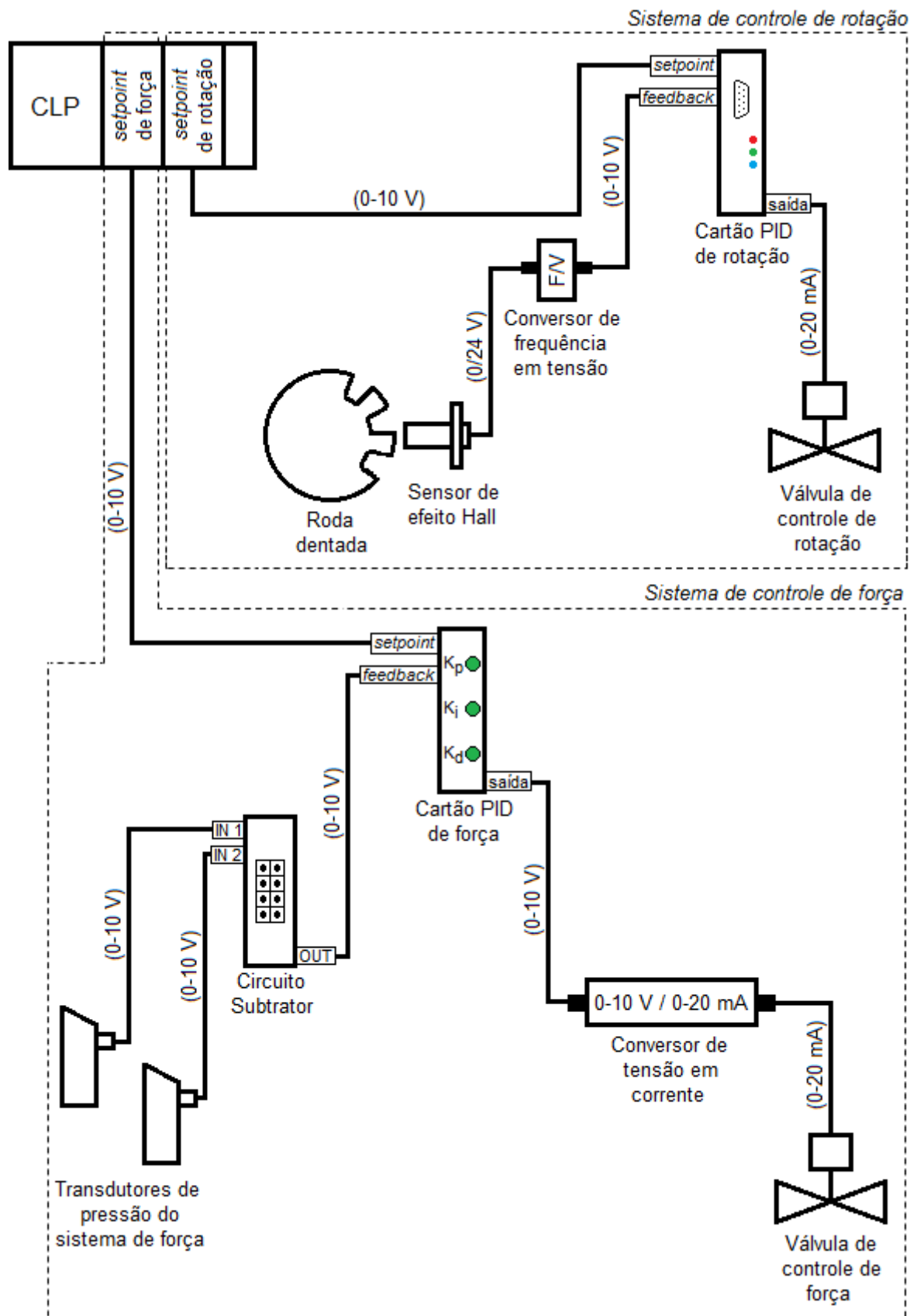


Figura 4.1 – Sistema original de controle de força e rotação da UPPA3

Além disso, havia um circuito subtrator, onde estavam ligadas as saídas analógicas dos sensores de pressão do cilindro hidráulico, e que enviava o sinal resultante ao cartão PID de força. Assim, o sinal de *feedback* do controlador PID de força era um sinal analógico proporcional à diferença de pressão. Conseqüentemente, o *setpoint* enviado a esse cartão, era um sinal analógico proporcional à diferença de pressão necessária para obtenção da força desejada. Outro fator importante é a presença de um conversor, responsável por transformar o sinal de tensão (0-10 V) em corrente (0-20 mA), devido a incompatibilidade dos sinais de saída do cartão PID e de entrada da válvula de controle de força.

Já no sistema de controle de rotação, nota-se a presença de um conversor de frequência em tensão, que transforma o sinal pulsado proveniente do sensor de rotação em um sinal analógico na faixa de 0 a 10 V, para que este possa ser lido pelo controlador PID. Uma das desvantagens da utilização desse tipo de conversor é a presença do *ripple*, que é uma oscilação indesejada no sinal de saída decorrente da supressão incompleta da forma de onda do sinal pulsado durante a conversão. Essa oscilação dificulta o controle e aumenta as chances de instabilidade, principalmente para baixas rotações, quando o período da onda do sinal pulsado é maior, intensificando o efeito de *ripple*. Esse é um dos fatores que pode explicar a impossibilidade de medição confiável de rotações abaixo de 1.300 rpm na UPPA3, relatada por Moura (2011) que, por conta disso, executou ensaios apenas com rotações iguais ou superiores a 1.400 rpm.

Não só no sistema de rotação, mas também no sistema de força, os erros associados à inserção de circuitos desnecessários na malha de controle trouxeram dificuldades e limitações para a UPPA3. Além da limitação de rotação na faixa de 1.400 a 1.700 rpm, o *setpoint* mínimo permitido pelo cartão PID de força era de 60 kN.

Outro fator importante é a dificuldade no ajuste dos cartões PID, principalmente do de força, já que nele as constantes do controlador (K_p , K_i e K_d) são ajustadas através de potenciômetros. Já no cartão PID de rotação, as constantes são ajustadas através de um programa próprio. Isso dificultava e até mesmo impedia a aplicação de métodos mais robustos no ajuste desses controladores.

Para otimizar o controle de força e rotação da UPPA3, o primeiro passo foi a reestruturação do sistema de controle, eliminando do circuito os itens desnecessários. Para isso, foram retirados do circuito os cartões PID, o subtrator e os conversores.

O CLP tem a capacidade de realizar as funções de todos esses itens e ainda possui saídas analógicas compatíveis com as válvulas de controle de força e rotação. Dessa forma, o

CLP foi ligado diretamente às válvulas e todas as funções de controle foram nele incorporadas.

Além disso, visando a obtenção do valor de vazão nominal da válvula do sistema de rotação, que será utilizado no controle a partir de uma rede neural, foram instalados dois novos sensores de pressão na UPPA3.

A vazão nominal da válvula de controle de rotação é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão por aresta da mesma, conforme equação 4.1, onde Q_x é a vazão nominal real em l/min, Δp é a diferença de pressão por aresta da válvula em bar e Q_n é a vazão nominal em l/min quando Δp é igual a 5 bar (BOSCH REXROTH AG, 2005).

$$Q_x = Q_n \times \sqrt{\frac{\Delta p}{5}} \quad (4.1)$$

No caso da válvula do sistema de rotação da UPPA3, Q_n vale 180 l/min. Assim, um dos sensores de pressão foi instalado na linha que alimenta a válvula e o outro na linha de saída da mesma, a qual alimenta o motor hidráulico, conforme Figura 4.2. Dessa forma, a partir da diferença de pressão por aresta da válvula, obtida pelo CLP através desses sensores, é possível que ele obtenha o valor de vazão nominal em tempo real.

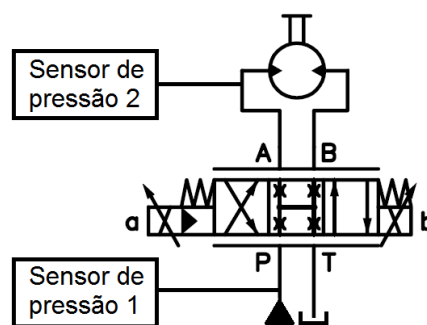


Figura 4.2 – Local de instalação dos sensores de pressão para obtenção da vazão nominal

Para que todas as funções de controle da UPPA3 passassem a ser executadas pelo CLP, foi necessária a sua reprogramação. Essa reprogramação foi realizada de forma a contemplar as novas metodologias de controle de força e rotação desenvolvidas, descritas nas seções 4.3, 4.4 e 4.5, e que foram direcionadas para a obtenção do melhor desempenho possível no

processo de reparo por atrito levando em consideração as suas características e dificuldades. Pela sua simplicidade e eficácia, para estruturar o novo programa do CLP foi utilizada a metodologia Grafcet, visando garantir a execução correta das etapas do processo. O diagrama Grafcet nada mais é do que uma representação gráfica que traduz um processo sequencial sem que haja incoerências, bloqueios, conflitos ou ambiguidades.

A reprogramação do CLP contemplou ainda a inserção de uma etapa de pressurização da linha do sistema de rotação. Para isso, foi feita uma mudança na sequência de acionamento das válvulas. Para entender melhor o motivo dessa alteração, pode ser considerado o esquema hidráulico do circuito completo do sistema de rotação representado pela Figura 4.3.

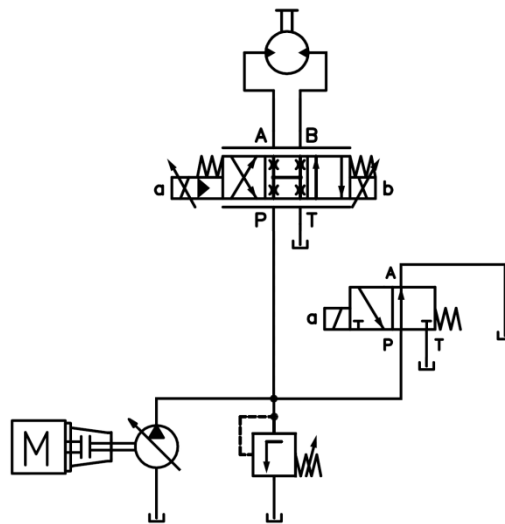


Figura 4.3 – Esquema simplificado do circuito hidráulico do sistema de rotação

Considerando o esquema da Figura 4.3, para acionar o sistema hidráulico de rotação da UPPA3, primeiramente é ativado o motor diesel responsável pelo acionamento da bomba. Depois disso, da forma como era feito anteriormente, ao acionar o sistema de controle de rotação, a válvula direcional simples era fechada ao mesmo tempo em que a válvula direcional proporcional era aberta. Pelo esquema apresentado, pode-se perceber que a pressão da linha só começa a aumentar depois que a válvula direcional simples é acionada, pois antes disso a linha de pressão está conectada diretamente ao tanque. Como a válvula direcional proporcional era acionada ao mesmo tempo em que a direcional simples, provocando o acionamento do motor hidráulico, a pressão da linha ia aumentando lentamente, já que havia vazão de óleo passando pelo motor hidráulico de pistão axial e, como ele estava girando em vazio, o torque era mínimo.

Assim, muitas das vezes, quando ocorria o contato entre pino e bloco no início do ensaio, a pressão da linha ainda estava baixa. Nesse instante, o torque no motor hidráulico aumentava rapidamente, fazendo com que essa pressão, também aumentasse de forma rápida.

A velocidade de aumento da demanda de torque no início do ensaio e, conseqüentemente, da pressão da linha é diretamente proporcional à força utilizada no reparo e também depende da geometria do pino e do bloco. Com o aumento de pressão, o torque no eixo da bomba também aumentava muito rápido. Dependendo da velocidade com que esse torque aumentava, o motor diesel simplesmente não conseguia acompanhar e acabava desligando automaticamente. Assim, o ensaio era interrompido.

Para resolver esse problema, foi inserida uma etapa de pressurização da linha, de forma que o sistema de controle de rotação só pode ser acionado depois de concluída essa etapa. O comando de pressurização da linha é feito a partir de um botão que foi inserido no painel elétrico da UPPA3 e que foi conectado diretamente ao CLP.

Depois de acionado o motor diesel, o botão de pressurização é liberado e o respectivo procedimento pode ser realizado. Ao acionar o botão de pressurização, a vazão da bomba (que possui vazão variável) é reduzida lentamente até que seu valor chegue à zero, através do envio do respectivo comando através de uma saída analógica do CLP. Durante essa redução de vazão, a pressão interna da bomba vai aumentando lentamente, fazendo com que o torque no seu eixo também aumente lentamente. Isso é feito de forma que o motor diesel consiga acompanhar esse aumento de torque sem ser desligado. Quando a vazão da bomba chega à zero, sua pressão interna é máxima e a pressão da linha de alimentação é zero. Nesse momento a válvula direcional simples é acionada. Em seguida, envia-se o comando para que a vazão da bomba aumente até chegar a seu valor máximo. Nesse instante, como a válvula direcional simples está acionada e a válvula direcional proporcional está fechada, a pressão da linha assume instantaneamente a pressão máxima e é finalizado o procedimento de pressurização.

Como mencionado anteriormente, de acordo com a nova metodologia implementada, o controle de rotação só pode ser ativado depois da pressurização do sistema. Assim, depois de iniciado o ensaio, quando há o contato entre pino e bloco a pressão da linha já está em seu valor máximo, o que faz com que toda a capacidade de torque do sistema já esteja disponível.

A metodologia anterior havia sido implementada como tal para facilitar o controle de rotação, pois, como as pressões eram mais baixas ao acionar a válvula direcional proporcional, não havia um aumento rápido da rotação nesse instante, o que poderia gerar

instabilidade no sistema de controle que era realizado a partir de um controlador PID. Com a nova metodologia, o sistema já possui sua capacidade máxima de torque desde o início do ensaio, porém o ajuste do controlador fica mais difícil. Isso porque, antes de acionar a válvula direcional proporcional, a pressão na sua entrada é máxima (310 bar) e na sua saída é zero, fazendo que no momento em que ela seja acionada haja um pico de rotação devido ao aumento rápido da vazão. Em seguida, o sistema tende a se estabilizar, caso o controlador seja bem projetado e esteja bem ajustado.

4.2. Desenvolvimento do Algoritmo Genético

Como as variáveis do CLP da UPPA3 podem ser acessadas através do padrão de comunicação OPC, isso viabiliza a aplicação de métodos mais robustos no ajuste dos controladores e, neste trabalho, o método de ajuste selecionado foi baseado em AGs.

O desenvolvimento do AG foi feito utilizando o *software* Matlab®, porém, apesar dele possuir ferramentas prontas para construção de AGs e para utilização da lógica *fuzzy*, elas não foram utilizadas. Optou-se, então, pela criação de funções próprias.

A sequência das operações executadas pelo AG desenvolvido é a mesma descrita na seção 2.6.

A população do AG desenvolvido é constituída de uma matriz em que cada linha corresponde a um indivíduo formado pelas constantes do controlador a ser ajustado, que no caso do PID seriam K_p , K_i e K_d , e no caso da rede neural seriam todos os pesos dos neurônios. A população inicial desse AG é gerada de forma aleatória, dentro de uma faixa pré-estabelecida pelo usuário para cada constante. Assim, os valores de cada coluna da matriz são gerados aleatoriamente dentro da respectiva faixa que foi determinada, já que cada coluna corresponde a uma constante.

No caso da função de avaliação desenvolvida, a qual é responsável pelo cálculo de aptidão, o primeiro passo executado é o teste dos indivíduos da população. O objetivo nessa etapa é obter as curvas de resposta para todos os indivíduos e, a partir delas, calcular os respectivos valores da integral do erro absoluto, do *overshoot* e do *settling time*. O critério para cálculo do *settling time* (2% ou 5%, por exemplo) é um dos parâmetros de entrada do AG e deve ser informado pelo usuário.

Para obtenção das curvas de resposta, neste trabalho são utilizados dois métodos. No primeiro deles a curva de resposta é obtida a partir de uma malha de controle teórica, desenvolvida para cada sistema utilizando o Simulink® do Matlab®, como ilustrado na Figura 4.4 para o sistema de força e na Figura 4.5 para o sistema de rotação. A planta corresponde ao modelo matemático obtido através do processo de identificação e a saturação do sinal de controle o limita para que ele fique dentro da faixa de operação do sistema real. Nota-se que aqui os controladores são testados nas respectivas plantas teóricas, ou seja, no modelo matemático correspondente ao sistema considerado, o qual foi obtido a partir da identificação.

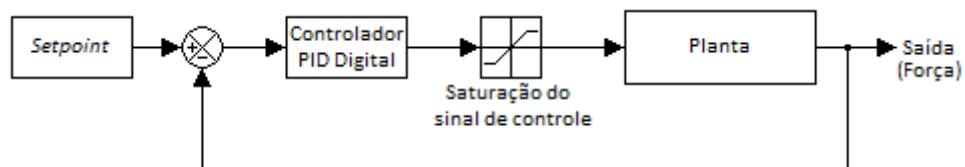


Figura 4.4 – Função de teste para obtenção da resposta do sistema de força para cada indivíduo

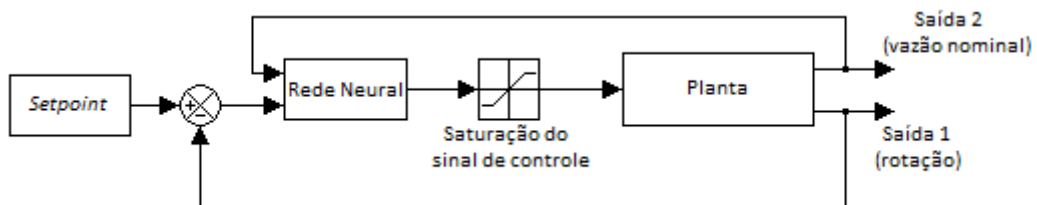


Figura 4.5 – Função de teste para obtenção da resposta do sistema de rotação para cada indivíduo

Em ambos os métodos, o *setpoint* e o tempo de teste (tempo para obtenção de cada curva de resposta) são pré-estabelecidos de acordo com o que se espera da dinâmica do sistema a ser controlado. No caso do sistema de controle de força da UPPA3, por exemplo, sabe-se que existe uma grande probabilidade de o *settling time* ser menor que três segundos para um *setpoint* de 50 kN e, assim, um tempo de teste razoável utilizando esse valor de força poderia ser definido em cinco segundos. Assim, cada indivíduo da população, um a um, tem suas constantes transferidas para o controlador e, em seguida, o sistema de controle é acionado já com o *setpoint* definido, o qual é o mesmo durante todo o processo de ajuste. O sistema de controle se mantém acionado até que o tempo de teste seja atingido e, ao fim, é

obtida então a curva de resposta para o respectivo indivíduo. Em seguida, inicia-se o mesmo procedimento para o próximo indivíduo, e o ciclo se repete até que todos sejam testados.

A diferença do segundo método em relação ao primeiro é que, ao invés de utilizar o modelo matemático da planta, é utilizada a própria UPPA3 para obtenção das curvas de resposta, ou seja, é utilizado o sistema real. Comunicando-se através de arquivos de texto (".txt"), as constantes do indivíduo a ser testado, o *setpoint* e o tempo de teste são transferidos do AG (Matlab®) para um programa de teste desenvolvido no Labview®. Esse programa de teste, ao receber esses dados, envia as constantes do indivíduo para o controlador, que está no CLP, através da comunicação OPC e executa o comando de ativação do sistema de controle a ser ajustado (força ou rotação). Ao fim do tempo de teste, o programa do Labview® desativa o sistema de controle e transfere a curva de resposta obtida para o AG, também através de arquivos de texto. Em seguida é realizado o mesmo procedimento para o teste do próximo indivíduo, e o ciclo se repete até que todos sejam testados. Na Figura 4.6 é apresentado como foi estruturado o sistema de comunicação para o ajuste utilizando a planta real.

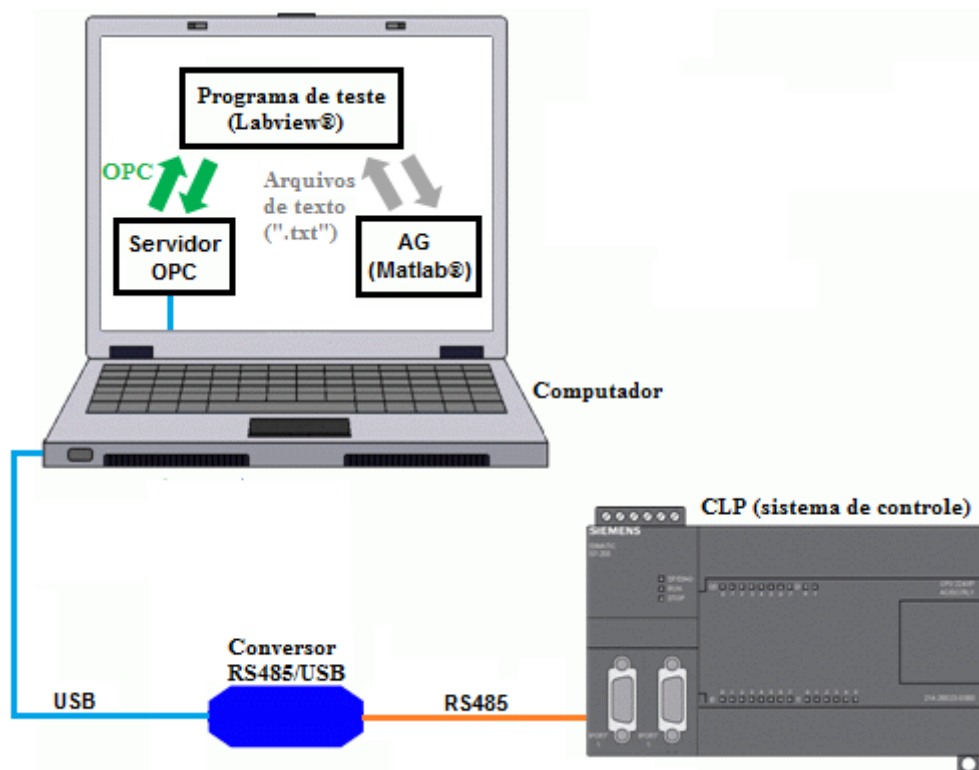


Figura 4.6 – Estrutura do sistema de comunicação para o ajuste dos controladores utilizando a planta real (UPPA3)

Como mencionado anteriormente, trabalhar com um modelo teórico traz muitas vantagens do ponto de vista de velocidade de processamento, permitindo a aplicação do método de sintonia de forma mais simplificada e rápida.

Para o ajuste utilizando o sistema real foi necessário criar programas auxiliares para realizar a interface entre o AG e a malha de controle da UPPA3. Esse é um procedimento bem mais complexo do que apenas criar uma função de teste no Simulink®, já que no caso do sistema real não estão envolvidos apenas programas de computador, mas também equipamentos diversos, como CLP, sensores, atuadores e todo o sistema hidráulico.

Além disso, o Simulink® consegue obter a resposta da planta teórica de forma muito rápida, já que é apenas uma simulação computacional. No caso da utilização da planta real, se o tempo de teste é cinco segundos, por exemplo, para cada indivíduo será gasto no mínimo esse tempo no teste, o que pode fazer com que cada geração seja bem mais demorada.

Por outro lado, devem ser ressaltadas as dificuldades encontradas no processo de identificação, pois além da necessidade de experiência para obter um bom resultado, nem sempre um modelo linear é suficiente para descrever de forma satisfatória as características de um sistema. Utilizando a planta real, esses problemas são mais bem resolvidos, já que todas as não linearidades e particularidades do sistema já estarão atuando durante o ajuste.

Devido às dificuldades na aproximação de um sistema real por uma planta teórica, nesse trabalho os modelos matemáticos obtidos a partir da identificação foram utilizados apenas para um primeiro ajuste dos controladores. Caso o ajuste obtido para um determinado controlador não apresente um desempenho satisfatório durante sua aplicação no sistema real, pretende-se utilizá-lo como ponto de partida para que o AG realize o ajuste final utilizando o sistema real.

Porém, mesmo obtendo um bom desempenho no controle da planta teórica, existe a possibilidade de o controlador ajustado na mesma obter um desempenho muito ruim quando implementado no sistema real. Nesse caso, foi utilizado o método da tentativa para definir o ponto de partida do AG no ajuste utilizando o sistema real.

Para realizar o ajuste utilizando o sistema real, o AG precisará realizar vários testes, sendo que esse procedimento pode levar muito tempo. Por isso, para um ajuste mais rápido é importante definir um ponto de partida viável para o AG, ou seja, um conjunto de constantes do controlador que não esteja muito distante do ideal. Caso isso aconteça, a quantidade necessária de testes para o ajuste pode ser tão grande, levando tanto tempo, que sua execução torna-se inviável.

Como mencionado anteriormente, através das curvas de resposta, a função de avaliação do AG obtém, para cada indivíduo, os respectivos valores dos parâmetros de desempenho, que são a integral do erro absoluto, o *overshoot* e o *settling time*. De posse desses valores, a função de avaliação utiliza-os para obter uma “nota” para cada indivíduo através da lógica *fuzzy*. Pelo critério adotado, quanto maior essa “nota”, maior é a aptidão do indivíduo, ou seja, melhor é o seu desempenho no sistema de controle considerado. O objetivo principal é classificar os indivíduos levando em consideração os três parâmetros de desempenho.

O primeiro passo na classificação dos indivíduos utilizando a lógica *fuzzy* é a *fuzzificação*, conforme descrito na seção 2.7. Para isso, são criados inicialmente os conjuntos para as três variáveis adotadas, que são correspondentes aos parâmetros de desempenho. Para cada variável foram atribuídos três conjuntos *fuzzy*: “Bom”, “Médio” e “Ruim”. Para todos os conjuntos foram atribuídas funções de pertinência Gaussianas, conforme apresentado na Figura 4.7 para a variável *fuzzy* “ST” (“*settling time*”), na Figura 4.8, “OV” (“*overshoot*”) e na Figura 4.9, “ITAE” (“integral do erro absoluto”).

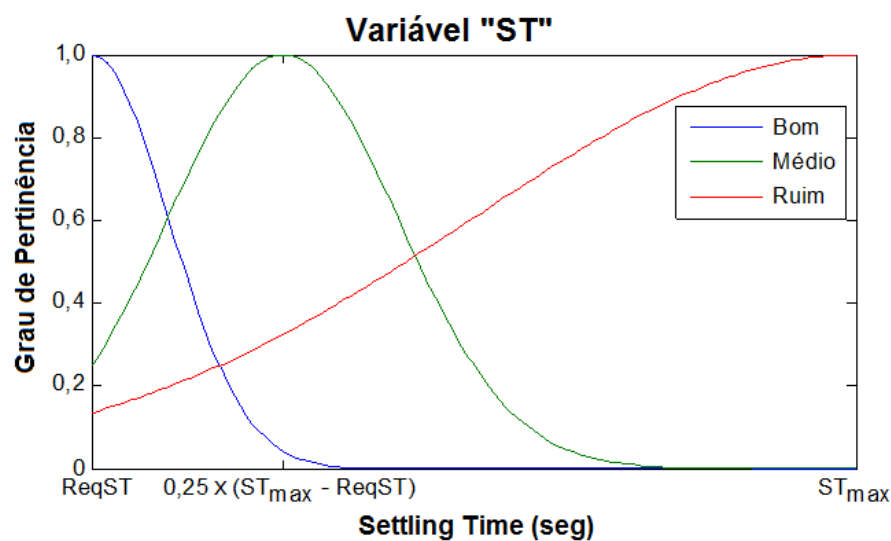


Figura 4.7 – Funções de pertinência da variável *fuzzy* “ST” (“*settling time*”)

Na Figura 4.7, “ST_{max}” é o maior valor obtido para o *settling time* entre todos os indivíduos testados e “ReqST” é o requisito de *settling time* adotado para o ajuste do sistema de controle considerado, o qual deve ser informado pelo usuário na função principal do AG. As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* “Bom”, “Médio” e “Ruim” da variável “ST” são descritas pelas equações 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente. A partir dessas equações é

possível obter o grau de pertinência de cada indivíduo em cada conjunto de acordo com o respectivo *settling time* (“ST”) obtido na resposta do sistema.

$$\mu_{ST_Bom}(ST) = e^{-\frac{(ST-ReqST)^2}{2 \times [0,1 \times (ST_{max}-ReqST)]^2}} \quad (4.2)$$

$$\mu_{ST_Médio}(ST) = e^{-\frac{[ST-ReqST-0,25 \times (ST_{max}-ReqST)]^2}{2 \times [0,15 \times (ST_{max}-ReqST)]^2}} \quad (4.3)$$

$$\mu_{ST_Ruim}(ST) = e^{-\frac{(ST-ST_{max})^2}{2 \times [0,5 \times (ST_{max}-ReqST)]^2}} \quad (4.4)$$

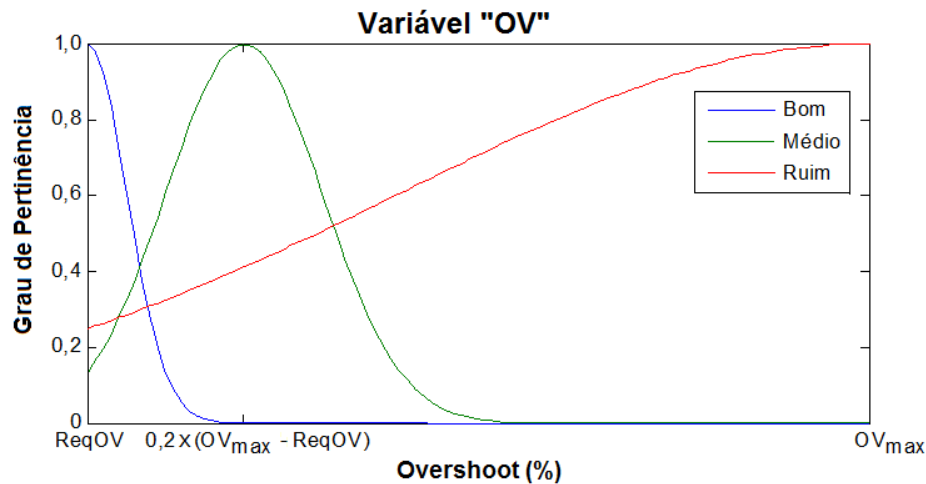


Figura 4.8 – Funções de pertinência da variável *fuzzy* “OV” (“overshoot”)

Similarmente ao gráfico da Figura 4.7, na Figura 4.8 “OV_{max}” é o maior valor obtido para o *overshoot* entre todos os indivíduos testados e “ReqOV” é o requisito de *overshoot* adotado para o ajuste do sistema de controle considerado, o qual também deve ser informado pelo usuário na função principal do AG. As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* “Bom”, “Médio” e “Ruim” da variável “OV” são descritas pelas equações 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. O grau de pertinência de cada indivíduo em cada conjunto é obtido a partir dessas equações de acordo com o respectivo *overshoot* (“OV”) obtido na resposta do sistema.

$$\mu_{OV_Bom}(OV) = e^{-\frac{(OV-ReqOV)^2}{2 \times [0,05 \times (OV_{max}-ReqOV)]^2}} \quad (4.5)$$

$$\mu_{OV_M\u00e9dio}(OV) = e^{-\frac{[OV-ReqOV-0,2\times(OV_{max}-ReqOV)]^2}{2\times[0,1\times(OV_{max}-ReqOV)]^2}} \quad (4.6)$$

$$\mu_{OV_Ruim}(OV) = e^{-\frac{(OV-OV_{max})^2}{2\times[0,6\times(OV_{max}-ReqOV)]^2}} \quad (4.7)$$

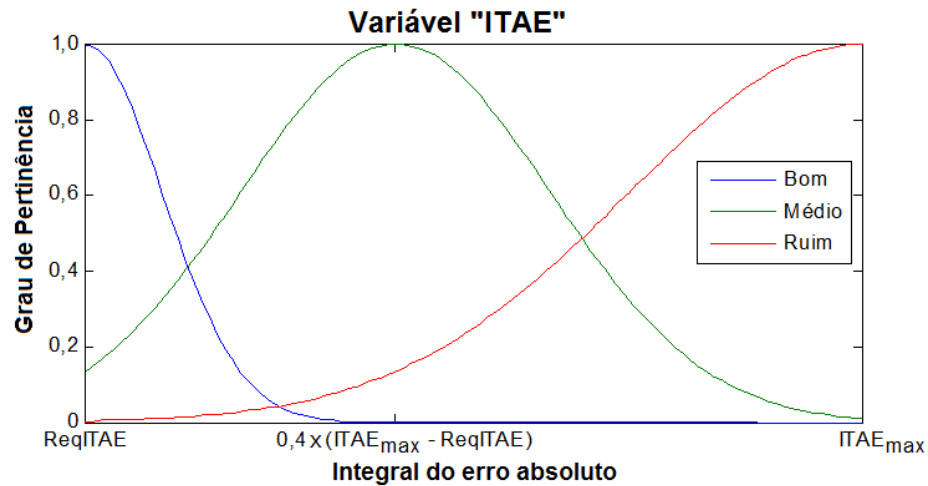


Figura 4.9 – Funções de pertinência da variável *fuzzy* “ITAE” (“integral do erro absoluto”)

Da mesma forma, na Figura 4.9 “ITAE_{max}” é o maior valor obtido para a integral do erro absoluto entre todos os indivíduos testados e “ReqITAE” é o requisito de integral do erro absoluto adotado para o ajuste do sistema de controle considerado, e que também deve ser informado pelo usuário na função principal do AG. As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* “Bom”, “M\u00e9dio” e “Ruim” da vari\u00e1vel “ITAE” s\u00e3o descritas pelas equa\u00e7\u00f5es 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente. O grau de pertin\u00eancia de cada indiv\u00edduo em cada conjunto \u00e9 obtido a partir dessas equa\u00e7\u00f5es de acordo com o respectivo valor da integral do erro absoluto (“ITAE”) obtido na resposta do sistema.

$$\mu_{ITAE_Bom}(ITAE) = e^{-\frac{(ITAE-ReqITAE)^2}{2\times[0,1\times(ITAE_{max}-ReqITAE)]^2}} \quad (4.8)$$

$$\mu_{ITAE_M\u00e9dio}(ITAE) = e^{-\frac{[ITAE-ReqITAE-0,4\times(ITAE_{max}-ReqITAE)]^2}{2\times[0,2\times(ITAE_{max}-ReqITAE)]^2}} \quad (4.9)$$

$$\mu_{ITAE_Ruim}(ITAE) = e^{-\frac{(ITAE-ITAE_{max})^2}{2\times[0,3\times(ITAE_{max}-ReqITAE)]^2}} \quad (4.10)$$

Foram utilizadas funções de pertinência Gaussianas por serem mais suaves quando comparadas, por exemplo, com funções triangulares ou trapezoidais.

A principal diferença entre os conjuntos *fuzzy* criados para as variáveis é a pressão seletiva. Pode ser observado, por exemplo, que é mais difícil um indivíduo obter um alto grau de pertinência no conjunto “Bom” da variável “OV”, do que no mesmo conjunto das outras duas variáveis. Isso acontece porque, no caso da variável “OV”, para obter um alto grau de pertinência no conjunto “Bom” é necessário que o indivíduo tenha um *overshoot* que esteja muito próximo do requisito de desempenho adotado. No caso das outras variáveis, para obter um grau de pertinência alto, essa distância pode ser um pouco maior, principalmente no caso da variável “ITAE”.

Dessa forma, as funções de pertinência dos conjuntos das variáveis *fuzzy* foram desenvolvidas de maneira que a pressão seletiva fosse maior para o *overshoot*, média para o *settling time* e menor para a integral do erro absoluto.

Um *overshoot* alto na resposta dos sistemas de força e rotação da UPPA3 pode gerar golpes de aríete no sistema hidráulico, principalmente quando há altas vazões envolvidas, como é o caso do sistema de rotação, o que poderia danificar o equipamento. Isso explica a escolha de uma pressão seletiva maior para esse parâmetro de desempenho.

No caso do *settling time*, um valor baixo desse parâmetro de desempenho na resposta do sistema de controle da UPPA3 é algo bastante desejado devido à dinâmica do processo de reparo por atrito, que exige alta velocidade de resposta do sistema de controle. Devido a esse fato, esse parâmetro de desempenho foi definido como sendo o segundo de maior pressão seletiva.

Já no caso da integral do erro absoluto, também é desejável que esse parâmetro de desempenho apresente um baixo valor, já que isso indica uma menor presença de erro no sistema controlado. Porém, valores baixos de integral do erro absoluto podem ocorrer em situações, por exemplo, em que o *overshoot* é alto e rápido, ou o *settling time* não é atingido por conta de oscilações repentinas na resposta do sistema. Essas possibilidades levaram à decisão de fazer com que esse fosse o parâmetro de desempenho com menor pressão seletiva.

Assim, no processo de *fuzzificação*, são obtidos os graus de pertinência de cada indivíduo em todos os conjuntos das variáveis *fuzzy*. Isso é feito a partir das funções de pertinência e dos respectivos parâmetros de desempenho de cada indivíduo. Assim, para cada um são obtidos nove graus de pertinência, já que as três variáveis *fuzzy* possuem três conjuntos cada uma.

Depois de obtidos os graus de pertinência de todos os indivíduos em todos os conjuntos, o processo de *fuzzificação* é finalizado e inicia-se o processo de inferência. A inferência consiste na aplicação de regras utilizando os graus de pertinência obtidos no processo de *fuzzificação*. As regras adotadas para a realização do processo de inferência são apresentadas na Tabela 4.1, onde é aplicado o operador “E”, descrito na seção 2.7.3. A última coluna corresponde ao resultado atribuído à variável “nota”. Assim, no processo de inferência, as variáveis de entrada “ST”, “OV” e “ITAE” são convertidas em uma única variável de saída: “nota”.

Tabela 4.1 – Regras utilizadas no processo de inferência do sistema de avaliação *fuzzy*

Regra	ITAE (Integral do erro absoluto)	Operador	OV (Overshoot)	Operador	ST (Settling time)	Nota (Resultado)
1	Bom	“E”	Bom	“E”	Bom	Ótimo
2	Bom		Médio		Muito Bom	
3	Bom		Bom		Bom	
4	Bom		Médio		Muito Bom	
5	Bom		Médio		Bom	
6	Bom		Médio		Médio	
7	Bom		Ruim		Bom	
8	Bom		Ruim		Médio	
9	Bom		Ruim		Ruim	
10	Médio		Bom		Muito Bom	
11	Médio		Bom		Bom	
12	Médio		Bom		Médio	
13	Médio		Médio		Bom	
14	Médio		Médio		Médio	
15	Médio		Médio		Ruim	
16	Médio		Ruim		Médio	
17	Médio		Ruim		Ruim	
18	Médio		Ruim		Muito Ruim	
19	Ruim		Bom		Bom	
20	Ruim		Bom		Médio	
21	Ruim		Bom		Ruim	
22	Ruim		Médio		Médio	
23	Ruim		Médio		Ruim	
24	Ruim		Médio		Muito Ruim	
25	Ruim		Ruim		Ruim	
26	Ruim		Ruim		Muito Ruim	
27	Ruim		Ruim		Péssimo	

Pode ser observado na Tabela 4.1 que foram definidos sete conjuntos para a variável de saída “nota”: “Ótimo”, “Muito Bom”, “Bom”, “Médio”, “Ruim”, “Muito Ruim” e “Péssimo”. Pode-se observar também que, na maioria dos casos, um conjunto de saída é resultado de mais de uma regra. Nesse caso, é adotado o maior grau de pertinência obtido como resultado das regras que levam a um mesmo conjunto. As regras 2, 4 e 10, por exemplo, levam ao conjunto “Muito Bom”, assim, o grau de pertinência atribuído a esse conjunto é o maior valor entre os resultados dessas regras.

Para um determinado indivíduo, depois de obtidos os graus de pertinência para todos os conjuntos da variável “nota”, é necessário iniciar então o processo de *defuzzificação*. Para a execução desse processo foi utilizado o método do centroide, descrito na seção 2.7.3. As funções de pertinência da variável de saída utilizadas para a *defuzzificação* são apresentadas na Figura 4.10.

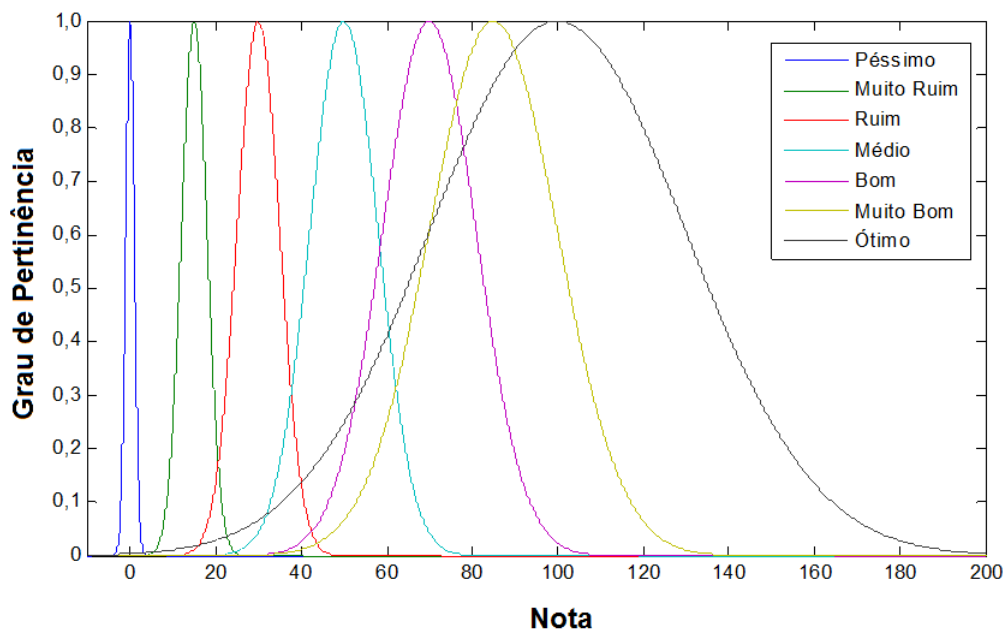


Figura 4.10 – Funções de pertinência da variável *fuzzy* “nota”

As funções de pertinência dos conjuntos “Ótimo”, “Muito Bom”, “Bom”, “Médio”, “Ruim”, “Muito Ruim” e “Péssimo” da variável “nota” são descritas respectivamente pelas equações 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17.

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-100)^2}{1800}} \quad (4.11)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-85)^2}{450}} \quad (4.12)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-70)^2}{242}} \quad (4.13)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-50)^2}{128}} \quad (4.14)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-30)^2}{50}} \quad (4.15)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{(\text{nota}-15)^2}{18}} \quad (4.16)$$

$$\mu_{\text{nota}}(\text{nota}) = e^{-\frac{\text{nota}^2}{2}} \quad (4.17)$$

Assim como nas variáveis de entrada, foram definidas funções de pertinência Gaussianas para os conjuntos da variável “nota”. Pode-se observar que quanto maior o grau de pertinência obtido para o conjunto “Ótimo”, por exemplo, maior é a chance de o indivíduo obter uma nota maior, já que é utilizado o método do centroide e essa função apresenta uma área maior. Pode ser observado ainda que à medida que se caminha no sentido do conjunto “Péssimo”, a área dos conjuntos vai diminuindo. Isso foi feito para que os conjuntos “melhores”, que são os mais desejados, tivessem mais peso na decisão de qual indivíduo recebe o maior valor de “nota”.

Depois de realizados os processos de *fuzzificação*, inferência e *defuzzificação* para todos os indivíduos, obtém-se o valor de “nota” relativo ao desempenho de cada um deles e com isso é finalizado o cálculo de aptidão. Assim, a aptidão de cada indivíduo nada mais é do que a “nota” que ele recebeu no processo de avaliação *fuzzy*, sendo que, como mencionado anteriormente, quanto maior esta “nota”, melhor é o seu desempenho no sistema de controle considerado.

No fluxograma da Figura 4.11 é apresentada uma visão geral das etapas executadas pelo AG no processo de avaliação dos indivíduos.

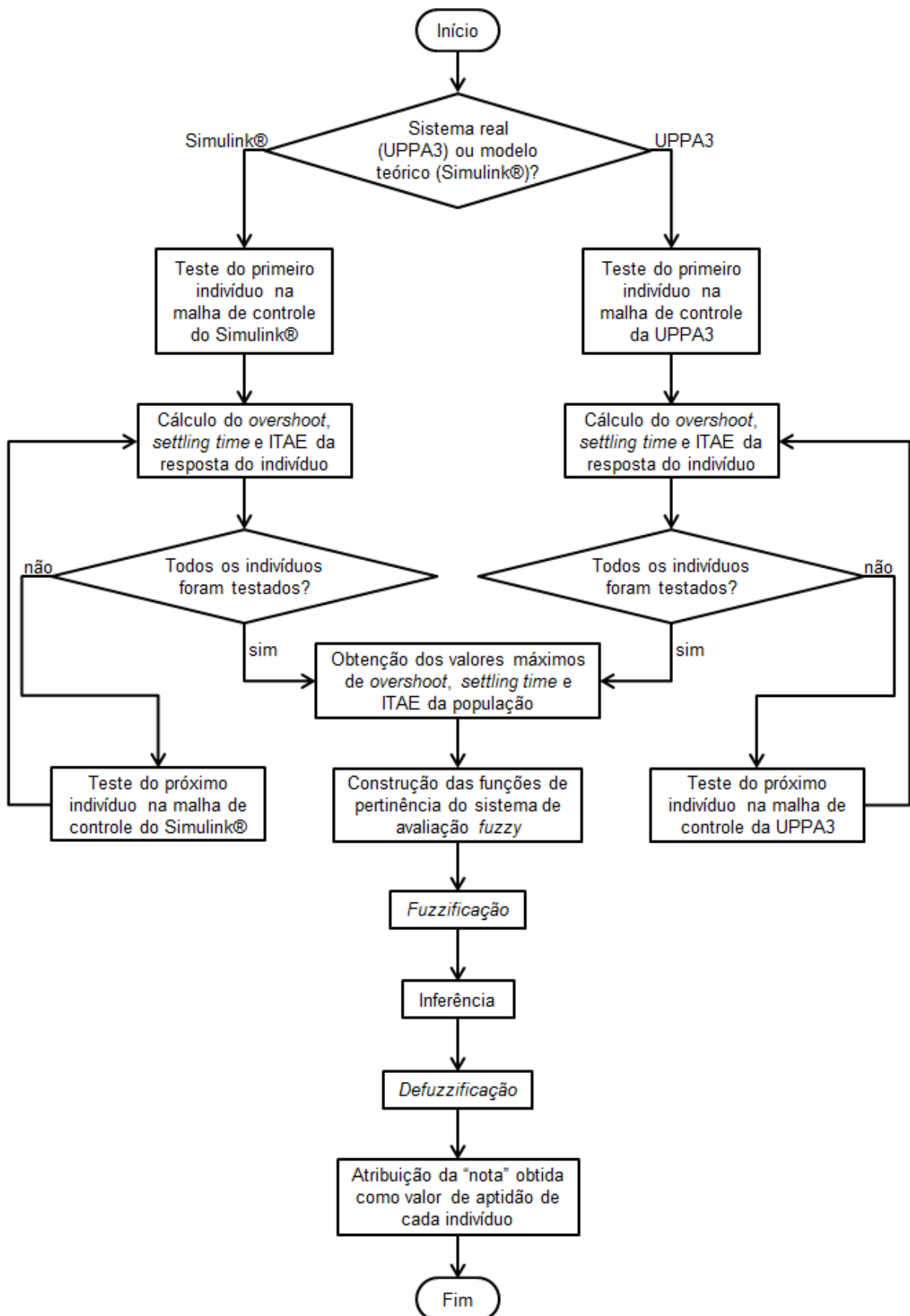


Figura 4.11 – Etapas executadas pela função de avaliação do AG

Ao fim do processo de avaliação dos indivíduos, é obtida uma matriz em que cada linha contém um indivíduo com suas respectivas constantes e os valores obtidos de integral do erro absoluto, *overshoot*, *settling time* e “nota”. Em seguida, os indivíduos são ordenados de acordo com a sua respectiva aptidão, sendo que na primeira linha da matriz está o que obteve a maior. Depois disso, se o indivíduo que obteve o menor valor de *settling time* não estiver entre os três primeiros de maior aptidão, ele passa a ocupar o quarto lugar, passando a ser considerado assim o quarto de maior aptidão. Da mesma forma, se o que obteve o menor valor de *overshoot* não estiver entre os quatro primeiros, ele passa a ocupar o quinto lugar e se o que obteve o menor valor de integral do erro absoluto não estiver entre os cinco primeiros, ele passa a ocupar o sexto lugar. A matriz final obtida é utilizada, então, nos processos de seleção do AG e na apresentação dos resultados.

Isso foi feito para que os indivíduos que obtiveram o melhor desempenho em apenas um dos parâmetros não fossem perdidos durante o processo de seleção para a próxima geração, e porque eles também são uma boa referência para o ajuste do controlador em questão.

As respostas obtidas pelos indivíduos, quando submetidos ao sistema de controle que está sendo ajustado, também são armazenadas em uma segunda matriz para que possam ser utilizadas posteriormente, por exemplo, na apresentação dos resultados.

Para realização do *crossover*, o método de seleção utilizado é o *ranking*, que foi descrito na seção 2.6. As “fichas” são distribuídas de acordo com a aptidão dos indivíduos e o tamanho da população. Se a população de entrada for de 10 indivíduos, por exemplo, para o primeiro (de maior aptidão) são dadas 10 “fichas”, para o segundo 9, e assim por diante. Para montar um par para o *crossover* são sorteados sempre dois indivíduos diferentes.

O método de *crossover* utilizado é a recombinação intermediária, também descrita na seção 2.6, sendo que o peso α_1 é um número aleatório entre 0 e 1 e o peso α_2 é igual a $(1-\alpha_1)$.

A mutação deve ser aplicada em uma parte dos filhos gerados no *crossover*. O primeiro passo executado nessa etapa é o sorteio aleatório de um dos filhos e, em seguida, de uma de suas constantes. São utilizados dois tipos de mutação, sendo que em um deles, que será denominado convenientemente “mutação maior”, a constante sorteada é multiplicada por um número aleatório entre 0 e 2 quando o AG está ajustando o controlador PID, e entre -1 e 2 no caso do ajuste da rede neural, já que nesta última podem haver constantes negativas. Já no outro tipo, convenientemente denominado “mutação menor”, essa constante é multiplicada por um número aleatório entre 0,9 e 1,1.

A “mutação menor” corresponde ao ajuste fino dos parâmetros do controlador. Já a “mutação maior”, mesmo que as constantes de melhor desempenho no sistema de controle a ser ajustado estejam fora do intervalo onde foi gerada a população inicial, através dela o AG tem a capacidade de buscar esses valores. É importante ressaltar ainda que a função de mutação foi desenvolvida de forma que nunca são realizadas duas mutações no mesmo indivíduo, independente do tipo.

O método utilizado pelo AG para a seleção de indivíduos para a próxima geração é o de reinserção ordenada, descrito na seção 2.6, que seleciona os melhores da população total (pais e filhos).

Considerando o tempo que o AG levará para executar uma geração utilizando o sistema real, já que, como mencionado anteriormente, nesse caso os testes dos indivíduos são mais demorados, o número de indivíduos da população total em cada geração (pais+filhos) foi definido como 50.

Como descrito na seção 2.6, através de testes pode-se encontrar a melhor configuração do AG de acordo com o problema, evitando convergência prematura ou esforço computacional desnecessário. Dessa forma, foram realizados testes de convergência para definir qual era a melhor combinação entre as quantidades de: indivíduos selecionados na reinserção, filhos, “mutações maiores” e “mutações menores”.

A soma do número de indivíduos selecionados na reinserção com o número de filhos deve ser igual a 50, já que este foi definido como sendo o tamanho da população total em cada geração. Assim, definindo o valor de um, obtém-se automaticamente o valor do outro.

Os testes de convergência com diferentes configurações para os parâmetros do AG foram realizados em uma planta teórica com um controlador PID. O sistema que foi implementado no Simulink® é similar ao de controle de força, mostrado na Figura 4.4, sendo que a função de transferência da planta que foi utilizada é mostrada na equação 4.18. O tempo de amostragem utilizado foi de 0,1 segundos e o tempo de teste de 10 segundos.

$$G_{\text{teste}}(s) = \frac{0,02 \times e^{-0,1s}}{3s^3 + 7s^2 + 5s + 1} \quad (4.18)$$

Pode ser observado que a função de transferência escolhida tem um atraso e polos estáveis. Já que esses testes tem apenas o objetivo de ajustar os parâmetros do AG, esse foi o requisito mínimo estipulado para a planta a ser utilizada. Assim, não foi estabelecido nenhum

outro critério para a escolha dessa função de transferência, sendo que qualquer outra que obedecesse a esse critério mínimo também seria válida.

As etapas seguidas para o ajuste dos parâmetros do AG na busca de uma boa configuração foram as seguintes:

- Primeiramente foi escolhida uma configuração de partida para os parâmetros do AG que devem ser ajustados (quantidades de: “filhos”, “mutações maiores”, “mutações menores” e indivíduos selecionados na reinserção);
- Baseando-se na configuração de partida, foram criadas outras configurações que se diferenciam em apenas um dos parâmetros cada uma para avaliar a influência de cada parâmetro na convergência do AG;
- Em seguida, foi determinado o número máximo de gerações e os requisitos de *overshoot* e *settling time* para o ajuste PID baseando-se em uma execução da configuração de partida;
- Foram, então, realizadas 100 execuções de cada uma das configurações criadas;
- Na sequência, foi verificada a porcentagem de convergência obtida com cada configuração, ou seja, para cada uma, em que porcentagem do total de execuções os requisitos de desempenho foram atingidos;
- Foi analisada a influência de cada parâmetro no desempenho do AG;
- A partir dos resultados obtidos, foram criadas configurações baseadas nas variações em relação à configuração de partida que se mostraram eficazes no desempenho do AG;
- Foram realizados novamente os testes de convergência;
- Por fim, foi escolhida a configuração de melhor desempenho.

Depois de configurados todos os parâmetros de desempenho, o AG ficou pronto para ser aplicado no ajuste dos controladores da UPPA3.

Para otimizar o tempo de ajuste do AG, foram adicionadas algumas funcionalidades extras, quais sejam:

- As respostas obtidas pelos indivíduos, quando submetidos ao sistema de controle que está sendo ajustado, são armazenadas em uma matriz a cada geração. Assim, quando um indivíduo é selecionado para a próxima geração, não há a necessidade de testá-lo novamente, economizando-se assim o tempo e o esforço no ajuste;
- São armazenados todos os indivíduos das gerações anteriores. Assim, ao fim do processo de mutação, se um indivíduo muito parecido a um que já foi testado em

gerações anteriores surgir, ele sofre uma “mutação maior”. Isso evita a perda de tempo e o esforço desnecessário no teste de indivíduos cujos desempenhos no controle do sistema considerado já são conhecidos. O critério adotado para que dois indivíduos sejam considerados muito parecidos é o seguinte: realiza-se a subtração entre os indivíduos (que são vetores) envolvidos, em seguida multiplica-se um dos indivíduos por 10^{-5} e se o resultado da subtração (em módulo) for menor que o da multiplicação então eles são considerados muito parecidos.

Portanto, para o ajuste dos controladores utilizando o AG é necessário informar os seguintes parâmetros de entrada: faixa de valores para geração da população inicial, *setpoint*, tempo de amostragem da planta, tempo de teste, critério para cálculo do *settling time*, requisitos de desempenho de *overshoot*, integral do erro absoluto e *settling time* e número máximo de gerações.

O resultado do ajuste contém as seguintes informações para os seis indivíduos com maior aptidão: constantes de ajuste do controlador, curva de resposta no sistema controlado e valores obtidos de integral do erro absoluto, *overshoot*, *settling time* e “nota”.

4.3. Controle de Força

O controle de força da UPPA3 foi realizado a partir de um controlador PID digital. A representação dessa malha de controle é apresentada na Figura 4.12.

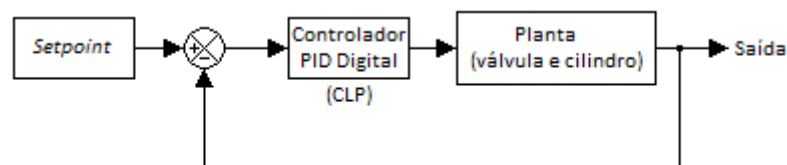


Figura 4.12 – Malha do sistema de controle de força da UPPA3

Como mencionado anteriormente na seção 2.4.1, o algoritmo do controlador PID digital presente no CLP que foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho é o mostrado na equação 4.19, onde T_s é o tempo de amostragem, $u(k)$ é o sinal de controle, $e(k)$ é o sinal de erro e K_p , T_i e T_d são os parâmetros que foram ajustados.

$$u_{\text{força}}(k) = K_p \left[e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right] \quad (4.19)$$

O tempo de amostragem utilizado para o sistema de controle de força foi de 20 ms, já que esse é um tempo viável e que está um pouco acima do limite de tempo de ciclo do CLP. Além disso, o controlador PID utilizado no CLP tem suas entradas (*setpoint* e sinal de *feedback*) limitadas entre 0 e 1, e sua saída (sinal de controle) entre -0,5 e 0,5. Assim, foi feita a parametrização do *setpoint* e do *feedback* de tal forma que a faixa de força de 0 a 400 kN correspondesse à faixa de 0 a 1 para as entradas do controlador. Da mesma forma, o sinal de controle, na faixa de -0,5 a 0,5, é convertido para corresponder à faixa de abertura da válvula de -100% a 100%, sendo que o sinal negativo indica a vazão no sentido em que o cilindro recua. Com relação às constantes K_p , T_i e T_d não existe limitação de valor.

A identificação da planta do sistema foi a primeira etapa executada para que, em seguida, pudesse ser realizado o ajuste através do AG.

4.3.1. Identificação da Planta

De acordo com o procedimento que deve ser executado no processo de identificação, descrito na seção 2.3, o primeiro passo deve ser a obtenção dos dados de entrada e saída do sistema. Assim, foi construído um experimento de identificação que explorasse toda a faixa operacional da planta de força da UPPA3 e, para isso, a respectiva válvula foi submetida a diversos níveis de abertura durante a coleta dos dados. Isso foi feito visando obter o máximo de informações sobre o sistema.

O experimento de identificação foi realizado em malha aberta, ou seja, sem o controlador PID e sem realimentação do sinal de saída da planta. O tempo de amostragem utilizado nesse experimento foi de 17 ms, que é o tempo de ciclo mínimo permitido pelo CLP.

Durante o processo de identificação, também foi feita a parametrização dos sinais de entrada (sinal enviado para a válvula, sendo que a faixa de -0,5 a 0,5 corresponde à faixa de abertura de -100% a 100%) e de saída da planta (força medida, sendo que a faixa de 0 a 1 corresponde à faixa de 0 a 400 kN).

Em seguida, foi utilizado o MathWork's System Identification Toolbox (SITB) do Matlab® para a identificação através dos dados de entrada e saída coletados no experimento. O modelo matemático utilizado para representar o sistema foi o de função de transferência.

Foram testados modelos de função de transferência com um atraso, um integrador e com até três polos e um zero e escolhido o que melhor representou o comportamento do sistema real.

4.3.2. Ajuste do Controlador PID

Depois de realizado o processo de identificação, o AG foi utilizado para ajustar o controlador PID na planta teórica a partir de um sistema de controle desenvolvido no Simulink®, como mostrando na Figura 4.12. No desenvolvimento desse sistema, tomou-se o cuidado de manter o mesmo tempo de amostragem do controlador PID da planta real. Assim, na simulação, a planta utilizada foi o modelo de função de transferência obtido na identificação e o controlador foi um PID digital com tempo de amostragem de 20 ms e com o mesmo algoritmo de controle e as mesmas limitações (sinais de entrada entre 0 e 1 e de saída entre -0,5 e 0,5) do utilizado pelo CLP.

Os critérios de desempenho para o *overshoot*, *settling time* e integral do erro absoluto adotados para o ajuste foram todos iguais a zero, tanto para o ajuste a partir do modelo teórico quanto para o ajuste no sistema real, buscando obter o melhor desempenho possível no controle. Assim, o critério de parada adotado para o AG foi a convergência, ou seja, a partir do momento em que ele não conseguir mais melhorar o desempenho do sistema de controle ele é finalizado. Para ambos os sistemas, teórico e real, o tempo de teste foi definido em 4 segundos e o critério adotado para o cálculo do *settling time* foi de 2%. O *setpoint* foi definido em 100 kN para o ajuste utilizando a planta teórica e 50 kN para o ajuste utilizando o sistema real, visando, neste último, maior segurança durante os testes.

Ao fim do ajuste utilizando a planta teórica, o indivíduo de melhor desempenho foi implementado no controlador PID do CLP e foi feito um teste para verificar o seu desempenho no sistema real. Para isso, primeiramente foram montados um bloco na morsa e um pino na placa de castanhas da UPPA3, conforme ilustrado na Figura 4.13. Nesse procedimento, inicialmente é enviado um sinal para a válvula que corresponde a uma abertura de 10% da mesma, o que provoca um avanço lento da haste do cilindro, aproximando pino e bloco. Quando há o contato físico entre pino e bloco e a força atinge um valor maior ou igual a 12 kN, o controlador PID é ativado e assim é iniciado o teste, onde o *setpoint* de força é alterado manualmente a partir de um programa desenvolvido no Labview®.

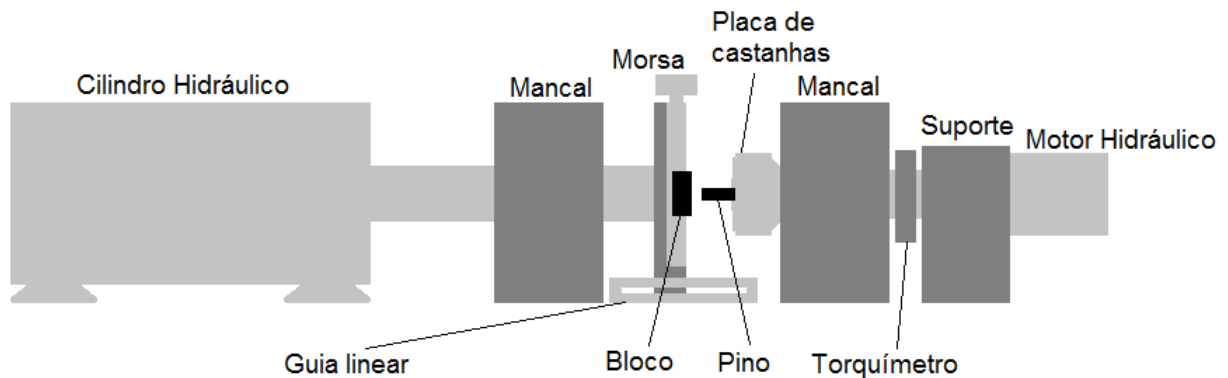


Figura 4.13 – Montagem do pino e do bloco na UPPA3 para o ajuste e teste do sistema de controle de força

Foi definido o valor 12 kN para detectar o contato porque durante a movimentação do cilindro foi observado que as forças máximas medidas chegavam a 10 kN. Porém, considerando apenas a incerteza dos sensores de pressão que são utilizados, é obtido o valor de 13 kN para a incerteza do sistema de medição de força da UPPA3.

Em seguida, o ajuste foi realizado no sistema real através do AG. Como mencionado anteriormente, nesse ajuste, o AG envia cada indivíduo que ele deseja testar para um programa de teste desenvolvido no Labview®. A montagem da Figura 4.13 também foi utilizada nessa etapa. Quando o AG envia um indivíduo para o programa de teste, o mesmo executa o procedimento descrito pelo fluxograma da Figura 4.14, que também descreve o procedimento executado pelo CLP.

Por fim, as constantes do indivíduo que obteve melhor desempenho, de acordo com o procedimento de ajuste do AG no sistema real, foram implementadas no controlador PID presente no CLP da UPPA3.

Programa de teste (Labview®)

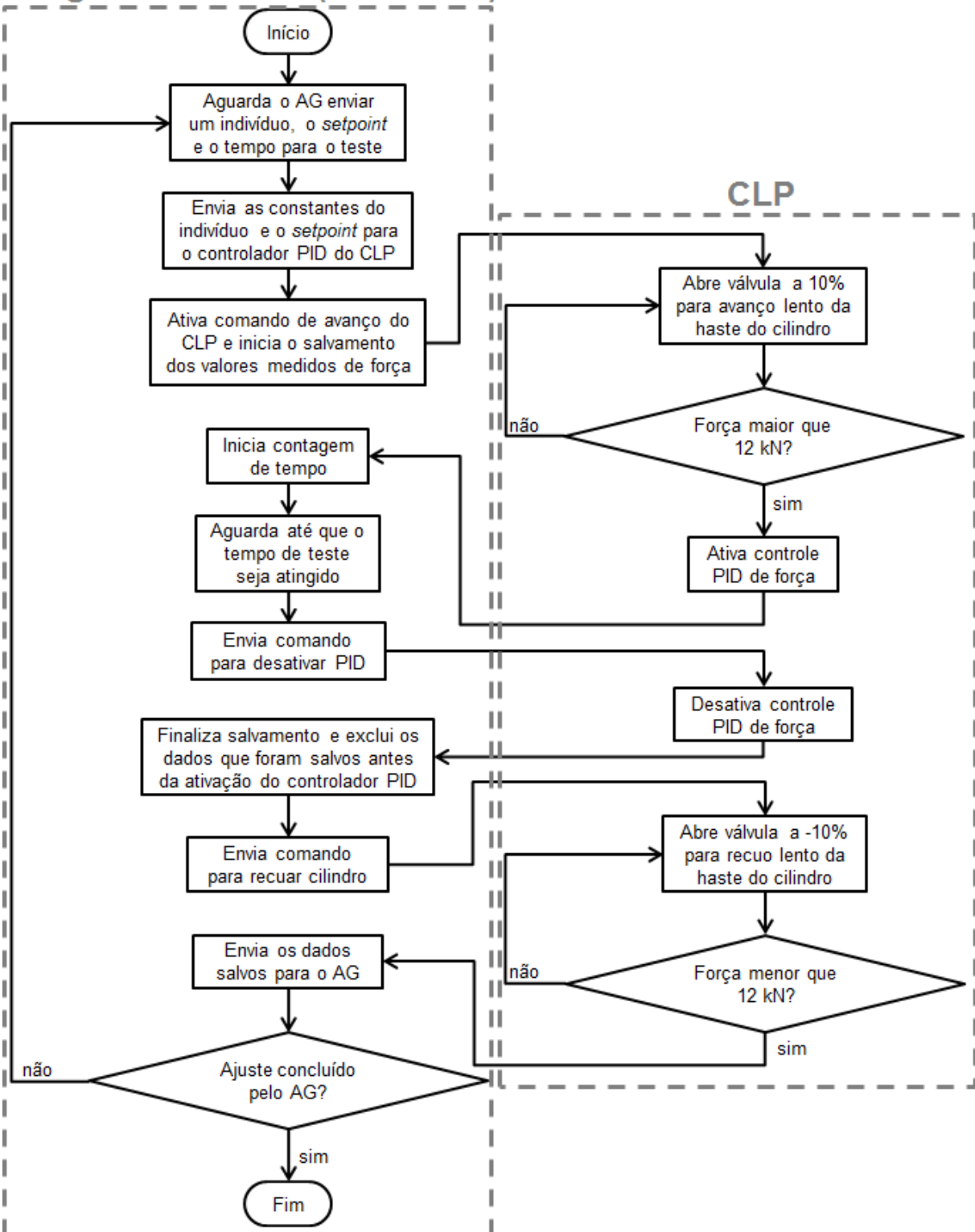


Figura 4.14 – Procedimento executado pelo programa de teste e pelo CLP no teste dos indivíduos do AG que realiza o ajuste PID de força utilizando o sistema real

4.4. Controle de Rotação

O controle de rotação da UPPA3 foi realizado a partir de uma rede neural que foi implementada no CLP. A representação dessa malha de controle é apresentada na Figura 4.15.

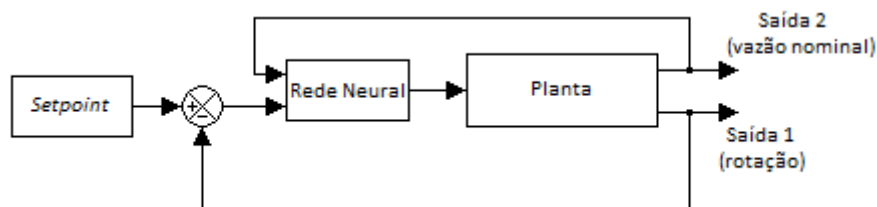


Figura 4.15 – Malha do sistema de controle de rotação da UPPA3

O tempo de resposta do sensor de rotação da UPPA3 é de 40 ms, portanto, esse foi o tempo de amostragem utilizado para o sistema de controle.

Para realizar o controle de rotação, o primeiro passo foi o desenvolvimento de um controlador do tipo rede neural. A identificação da planta do sistema foi a segunda etapa executada e, em seguida, foi realizado o ajuste da rede neural na planta teórica através do AG. Depois, o método da tentativa foi empregado no ajuste do sistema de controle real e, por fim, o AG utilizou esse mesmo sistema para o ajuste definitivo do controlador.

4.4.1. Projeto do Controlador

O objetivo nessa etapa foi desenvolver uma rede neural (RN) capaz de controlar a rotação da UPPA3 mesmo com as grandes variações de torque que acontecem durante o processo de reparo por atrito.

Para realizar o teste dos controladores, foi desenvolvida uma planta teórica que simula um comportamento similar ao do sistema de rotação da UPPA3, que, como mencionado anteriormente, é composto por um motor hidráulico controlado por uma válvula direcional proporcional.

Considerando o sistema hidráulico de controle de rotação da UPPA3 representado pela Figura 4.16, com o aumento do torque no motor hidráulico durante o processo de reparo por atrito, a diferença de pressão no mesmo (“ Δp_m ”) aumenta proporcionalmente (BOSCH REXROTH AG, 2005). Continuando o raciocínio, para uma pressão de alimentação do sistema (“P”) constante e considerando a pressão do tanque ou descarga (“T”) igual à zero,

com esse aumento em “ Δp_m ”, necessariamente a diferença de pressão por aresta da válvula (“ Δp ”) diminui.

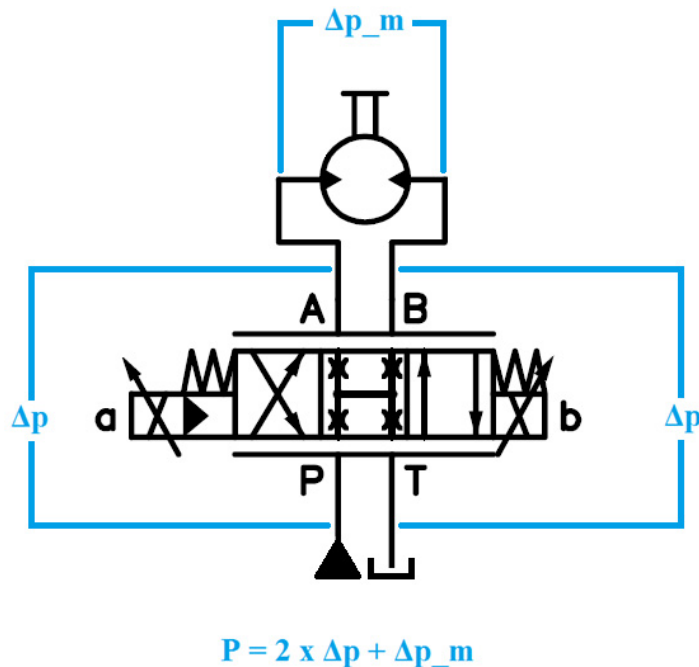


Figura 4.16 – Sistema hidráulico de controle de rotação da UPPA3 com as respectivas perdas de carga

O controle de rotação do motor hidráulico nada mais é do que um controle de vazão. Isso porque a vazão de óleo que passa pela válvula é a mesma que passa pelo motor e esta é diretamente proporcional à sua rotação. A vazão nominal é equivalente à vazão da válvula quando a mesma está com abertura de 100%. Como descrito na seção 4.1, ela é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão por aresta na válvula. Assim, o aumento de torque provoca uma redução na vazão nominal, alterando o comportamento do sistema.

Já a vazão na válvula, quando esta está fixa com uma determinada abertura, é proporcional à vazão nominal (BOSCH REXROTH AG, 2005). Dessa forma, para que a rotação seja mantida, no caso de um aumento de torque é necessário abrir mais a válvula. Isso porque, nesse caso, há uma redução na vazão nominal e se a mesma abertura for mantida consequentemente a vazão será menor e, assim, a rotação também. O inverso ocorre quando o torque diminui, ou seja, é necessário fechar mais a válvula para manter a rotação num valor constante.

Considerando o raciocínio apresentado, foi desenvolvido um sistema de controle no Simulink®, estruturado conforme ilustrado na Figura 4.17, para simular o comportamento do sistema real e realizar o ajuste e teste dos controladores que foram desenvolvidos.

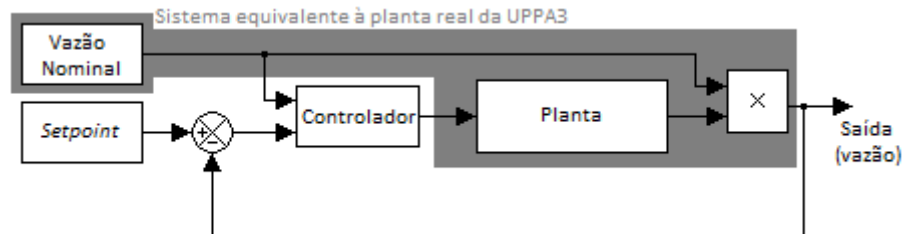


Figura 4.17 – Sistema desenvolvido no Simulink® para o projeto do controlador do sistema de rotação

Pode ser observado na Figura 4.17 que a saída da planta é multiplicada pela vazão nominal. Assim, considerando que vazão e rotação são sempre proporcionais, da mesma forma como acontece no sistema real, no modelo teórico a vazão da válvula é proporcional à sua vazão nominal e consequentemente a rotação também. A saída da planta, antes de ocorrer a multiplicação pela vazão nominal, é proporcional à rotação para um torque sempre constante. Caso esse torque varie, quem muda é apenas a vazão nominal, e assim a vazão de saída do sistema e consequentemente a rotação final também.

No sistema real a vazão nominal é medida ao longo do processo de reparo por atrito. Já no modelo teórico, é definido um conjunto de valores de tal forma que ocorra uma variação significativa desse parâmetro durante o teste de um controlador. Dessa forma, o distúrbio gerado pela variação do torque, que provoca uma variação direta na vazão nominal, também é simulado no modelo matemático. Assim, o modelo teórico busca simular o comportamento do processo real em uma situação crítica, ou seja, com alta variação de torque, como acontece durante o reparo por atrito. Foi utilizado um modelo de função de transferência para representar a planta do sistema teórico, a qual é descrita pela equação 4.20.

$$G_{\text{planta}}(s) = \frac{e^{-0,1s}}{s + 1} \quad (4.20)$$

Por se tratar de um sistema hidráulico de controle de vazão a partir de uma válvula proporcional, espera-se que o modelo da planta real da UPPA3 tenha pelo menos um atraso e um polo estável. Já que esse modelo teórico tem apenas o objetivo de comparar o desempenho

das redes neurais no controle de um sistema com o mesmo comportamento do de rotação da UPPA3, esse foi o requisito mínimo estipulado para a planta a ser utilizada. Assim, não foi estabelecido nenhum outro critério para a escolha dessa função de transferência, sendo que qualquer outra que obedecesse a esse critério mínimo também seria válida.

Para realizar os testes dos controladores, foi adotada uma variação da vazão nominal ao longo do tempo de teste conforme a mostrada na Figura 4.18 e descrita pela equação 4.21, onde Q_x é a vazão nominal em função do tempo t .

$$Q_x(t) = \frac{1}{1 + 2 \times e^{-\frac{(t-5)^2}{0.5}}} \quad (4.21)$$

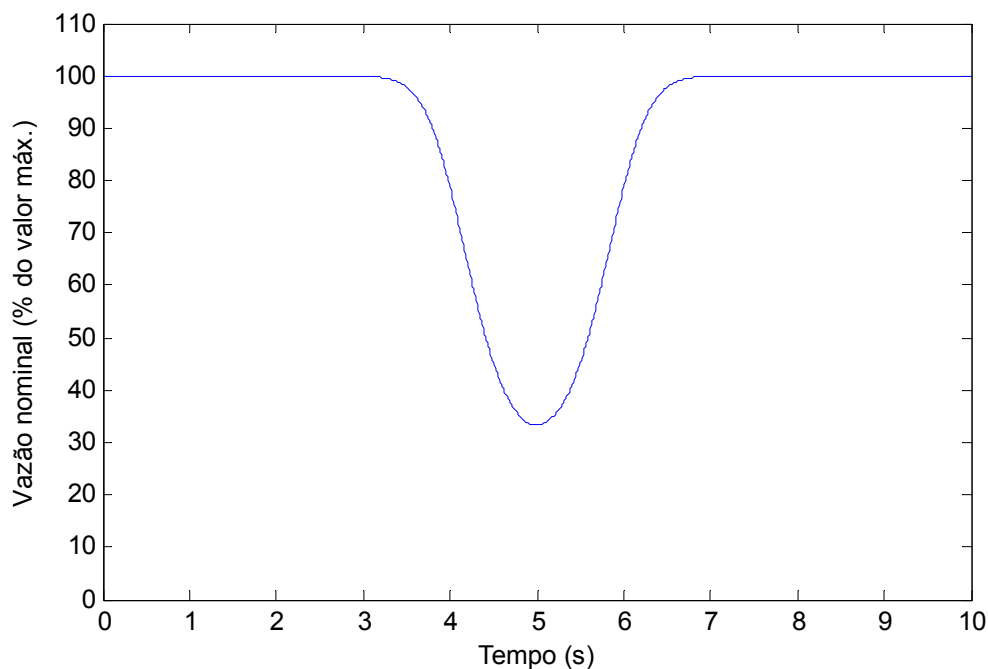


Figura 4.18 – Variação da vazão nominal adotada nos testes das redes neurais projetadas

Baseando-se na equação 4.1 apresentada anteriormente, que faz a relação entre diferença de pressão por aresta da válvula e vazão nominal, pode ser obtida a relação apresentada pela equação 4.22, onde Q_x é a vazão nominal real em l/min, Δp é a diferença de pressão por aresta da válvula em bar e Q_n é a vazão nominal em l/min quando Δp é igual a Δp_0 .

$$\Delta p = \Delta p_0 \times \left(\frac{Q_x}{Q_n}\right)^2 \quad (4.22)$$

Considerando a relação entre a diferença de pressão por aresta da válvula e a diferença de pressão no motor hidráulico apresentada anteriormente a partir da Figura 4.16, pode ser obtida a relação da equação 4.23, onde P é a pressão de alimentação do sistema, Δp_m é a diferença de pressão no motor e Δp é a diferença de pressão por aresta da válvula.

$$\Delta p_m = P - 2 \times \Delta p \quad (4.23)$$

Para o sistema de rotação da UPPA3, P vale 310 bar, assim, esse é o máximo valor que pode ser obtido por Δp_m (quando Δp é igual a zero). Substituindo Δp na equação 4.23 pela relação da equação 4.22, obtém-se a relação da equação 4.24.

$$\Delta p_m = P - 2 \times \Delta p_0 \times \left(\frac{Q_x}{Q_n}\right)^2 \quad (4.24)$$

Já a relação entre o torque M (N.m) e a diferença de pressão Δp_m (bar) para o motor hidráulico da UPPA3 é mostrada na equação 4.25 (BOSCH REXROTH AG, 2005).

$$M = 1,9871 \times \Delta p_m \quad (4.25)$$

Assim, o máximo torque M que pode ser obtido pelo motor é de 616 N.m, quando Δp_m vale 310 bar. Substituindo Δp_m na equação 4.25 pela relação da equação 4.24, obtém-se a relação da equação 4.26.

$$M = 1,9871 \times \left[P - 2 \times \Delta p_0 \times \left(\frac{Q_x}{Q_n}\right)^2 \right] \quad (4.26)$$

Para o sistema de rotação da UPPA3, P vale 310 bar, Δp_0 vale 5 bar e Q_n vale 180 l/min. Assim, para um torque igual a zero ($M = 0$), obtém-se o valor de vazão nominal máxima Q_x igual a 1.002,2 l/min. A relação aproximada entre a vazão Q na válvula em l/min e a vazão nominal Q_x em l/min para uma determinada porcentagem de abertura Ab da válvula é dada pela equação 4.27.

$$Q \cong Ab \times Q_x \quad (4.27)$$

Considerando a equação 4.27 para o cálculo da vazão, caso a válvula estivesse completamente aberta ($A = 100\% = 1$) quando a vazão nominal estivesse em seu valor máximo (1.002,2 l/min), pela relação da equação 4.28, teoricamente a rotação R iria atingir seu valor máximo, igual a 8.018 rpm. Porém, isso não é possível, já que a bomba não consegue suprir tal vazão, sendo que, no caso da UPPA3, a vazão máxima da bomba é de 220 l/min. A partir do momento em que a vazão atinge um valor maior que esse, a pressão de alimentação do sistema P começa a cair e, por isso, esse é o limite do sistema.

$$R = 8,0 \times Q \quad (4.28)$$

Para o gráfico da Figura 4.18, foi considerado que a vazão nominal de 100% corresponde à vazão nominal máxima da UPPA3, ou seja, 1.002,2 l/min. No modelo do Simulink® trabalha-se com valores na faixa de 0 a 1 (0 a 100%) para vazão nominal. O ganho em malha aberta da função de transferência (equação 4.20) foi escolhido como sendo unitário porque, como existe a multiplicação da vazão nominal pela saída da planta, a vazão teórica máxima do modelo é a mesma do sistema real. Da mesma forma, o *setpoint* pode ser escolhido em função da porcentagem da vazão máxima, a qual se relaciona com a rotação pela equação 4.28. Isso facilita a compreensão do funcionamento do modelo teórico construído.

Durante os testes dos controladores foi utilizado um *setpoint* 12,5%, o que equivale a uma vazão de 125,3 l/min e uma rotação de aproximadamente 1.000 rpm.

A partir da equação 4.26 e da curva de vazão nominal da Figura 4.18 (considerando o valor de vazão nominal em l/min), pode ser obtida a curva de torque em função do tempo que foi simulada durante os testes das redes neurais, a qual é mostrada na Figura 4.19.

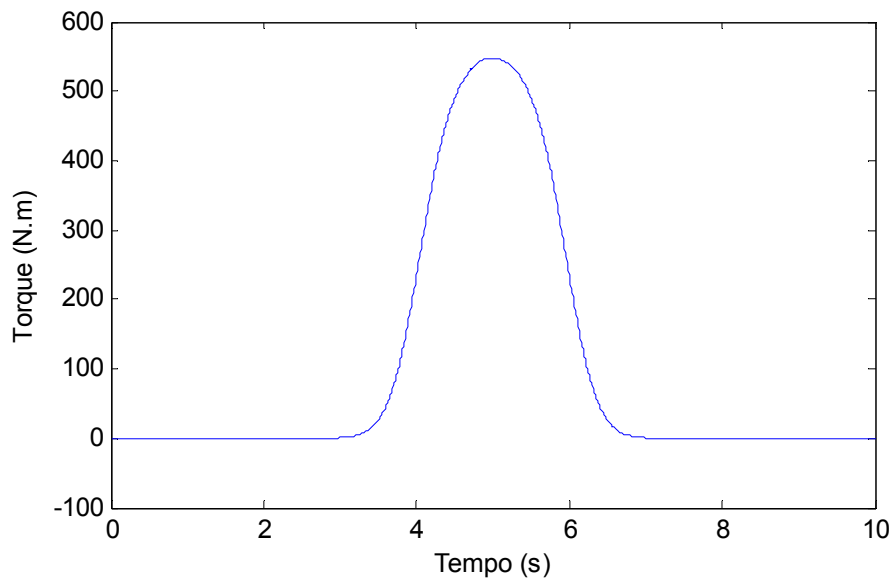


Figura 4.19 – Torque simulado nos testes durante o ajuste das redes neurais projetadas

A resposta do sistema em malha aberta, ou seja, sem o controlador, sem a realimentação e com o sinal de *setpoint* ligado diretamente à entrada da planta, para uma entrada degrau de amplitude 0,125, é mostrada na Figura 4.20.

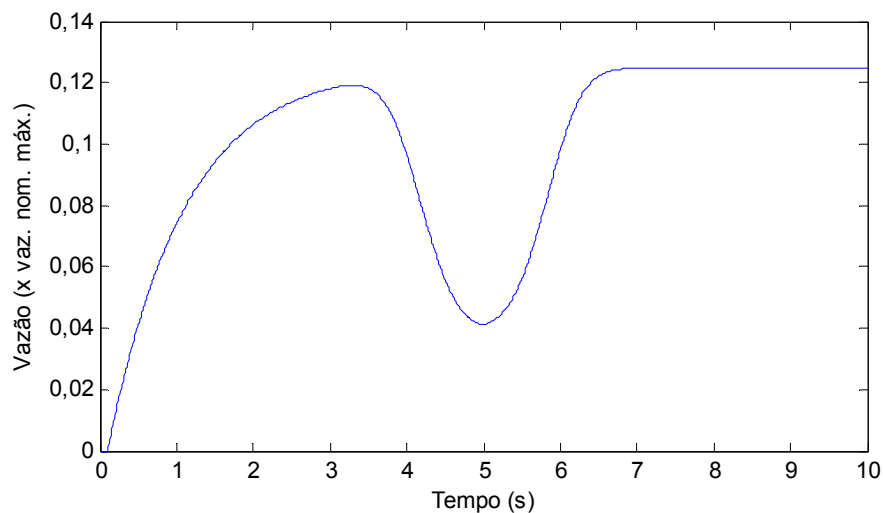


Figura 4.20 – Resposta em malha aberta do sistema utilizado nos testes das redes neurais para uma entrada degrau de amplitude 0,125

Depois de definido o modelo do sistema implementado no Simulink®, foram desenvolvidas as estruturas das redes neurais. O primeiro passo nessa etapa foi a definição dos parâmetros de entrada dessas redes.

A partir da equação 4.26 pode-se concluir que quando há um aumento na vazão nominal, necessariamente houve uma redução no torque e, portanto, é necessário reduzir o nível do sinal de controle enviado para a válvula para manter a rotação constante. Assim, ao invés de utilizar diretamente o valor de vazão nominal como um dos parâmetros de entrada da rede neural, é utilizado o inverso disso, ou seja, $1/Q_x$.

A derivada do valor inverso da vazão nominal também é utilizada, procurando fazer com que a rede neural tenha a capacidade de se antecipar e fazer com que o sistema reaja rapidamente a uma variação de torque. Outras três entradas que também foram utilizadas são equivalentes aos parâmetros de um controlador PID similar ao utilizado no sistema de controle de força, ou seja, são definidas como as partes proporcional, integral e derivativa do erro. Por último, como mostrado na seção 2.5, cada neurônio da rede deve conter o *bias*, que é equivalente à um valor de “*offset*” do mesmo. O *bias* é uma entrada com valor igual a 1 e também possui um peso associado em cada neurônio. Assim, o sistema de controle pode ser representado conforme a Figura 4.21, onde são mostrados os parâmetros de entrada da rede neural.

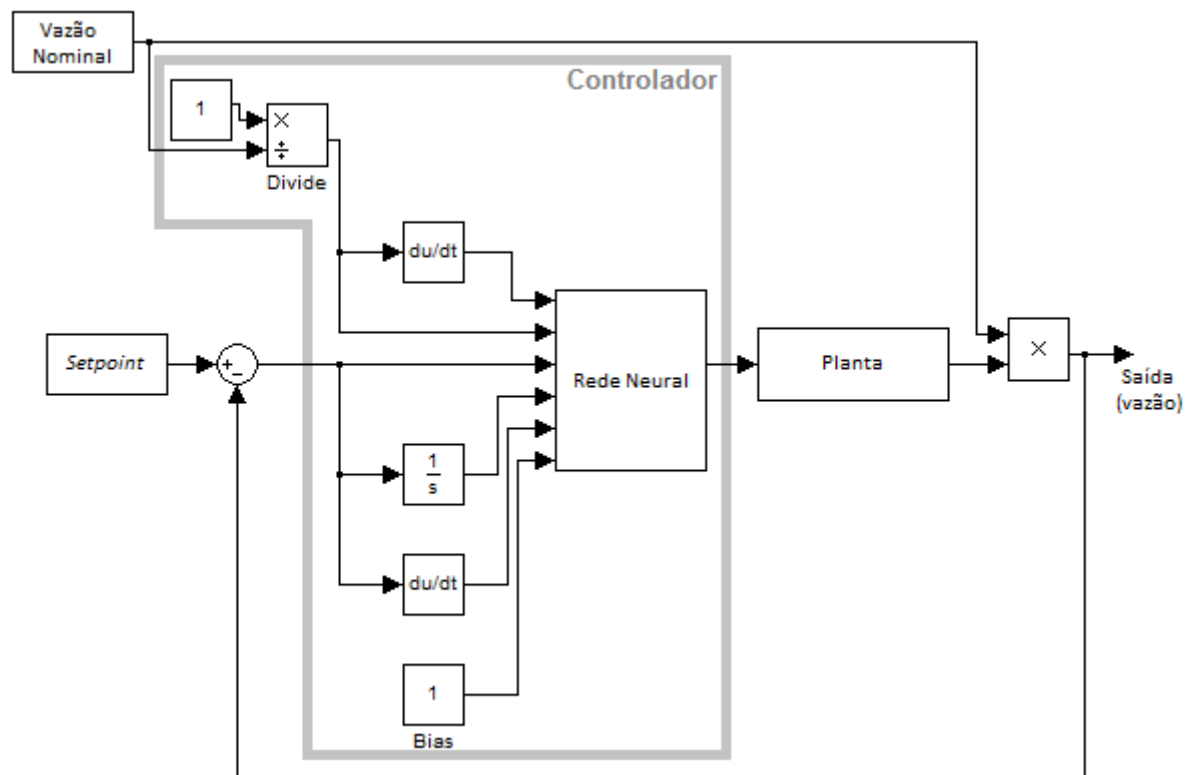


Figura 4.21 – Sistema de controle desenvolvido no Simulink® para os testes das RNs

Depois de definidos os parâmetros de entrada das redes neurais, foram desenvolvidas as estruturas das mesmas com base na quantidade, no tipo e na disposição dos neurônios. Para isso, foram projetadas RNs com estruturas variadas, compostas de um, três, quatro e seis neurônios. Considerando a estrutura de um neurônio artificial sob o ponto de vista de controle, descrita na seção 2.5, o sistema dinâmico linear utilizado foi uma função de transferência unitária: $H(s) = 1$. Com relação às funções de ativação, foram utilizadas as do tipo linear, quadrática, sigmoide e degrau.

Na Figura 4.22 são apresentadas as estruturas das redes neurais testadas, onde x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_5 são respectivamente: a derivada do inverso da vazão nominal, o inverso da vazão nominal, a parte proporcional ao sinal de erro, a integral do sinal de erro e a derivada do sinal de erro. Nessa mesma figura, as letras “L”, “S”, “Q” e “D” presentes nos neurônios correspondem às suas respectivas funções de ativação, descritas pelas equações 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 respectivamente e, nessa ordem, significam: linear, sigmoide, quadrática e degrau.

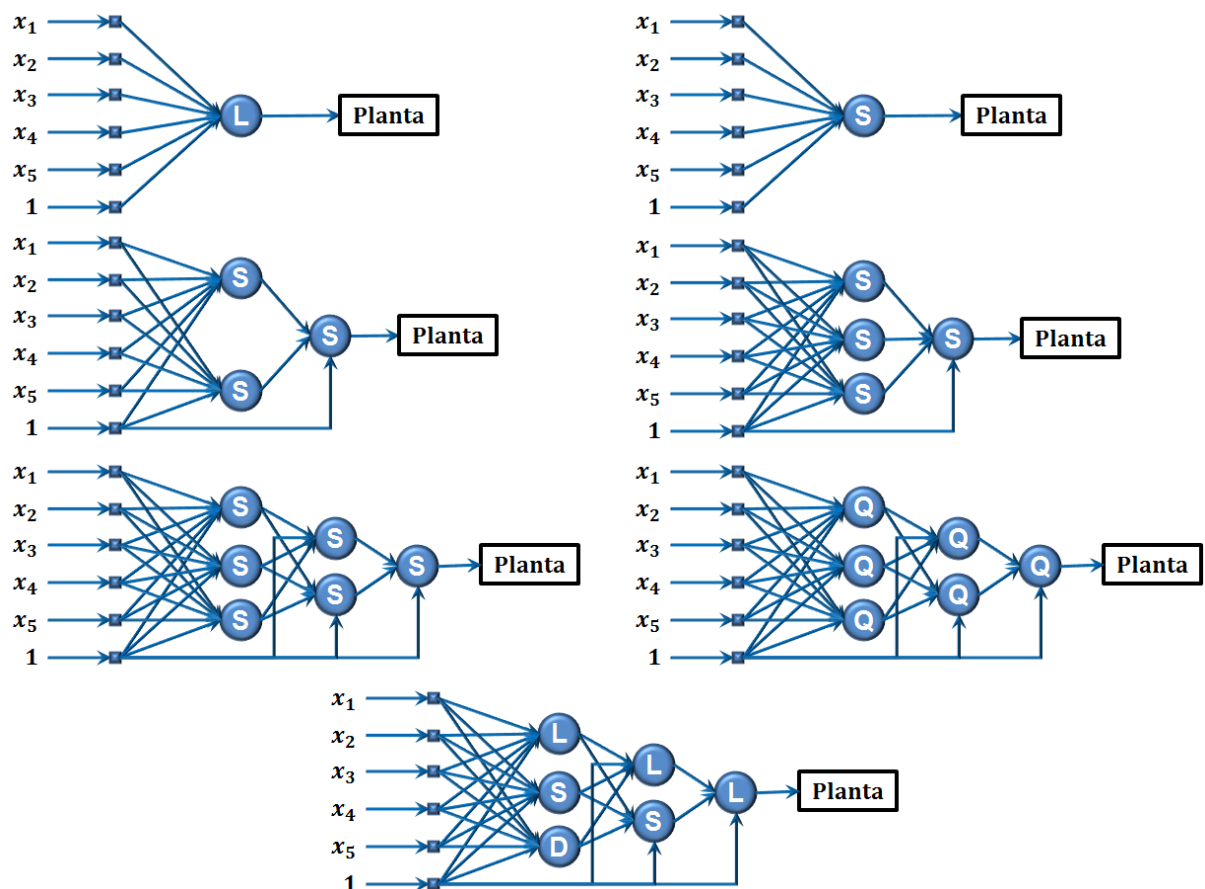


Figura 4.22 – RNs projetadas para o sistema de controle de rotação

$$f_L(u) = u \quad (4.29)$$

$$f_S(u) = \frac{1}{1 + e^{-u}} \quad (4.30)$$

$$f_Q(u) = u^2 \quad (4.31)$$

$$f_D(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u \geq 0 \\ 0 & \text{se } u < 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

A definição das estruturas das RNs foi feita com base na tentativa, pois de acordo com o processo de utilização do conceito de redes neurais, se uma determinada RN não apresentar um desempenho satisfatório na solução de um problema, o que pode ser feito é mudar o tipo de função de ativação, a quantidade de camadas da rede e/ou a quantidade de neurônios.

Como descrito na seção 2.5, cada entrada de cada neurônio possui um peso associado. O AG será responsável pelo ajuste dos pesos de cada rede neural. Para facilitar a identificação desses pesos na rede neural, os neurônios foram numerados na ordem de cima para baixo e da esquerda para a direita. Assim, para uma rede de seis neurônios, por exemplo, a numeração é feita conforme indicado na Figura 4.23.

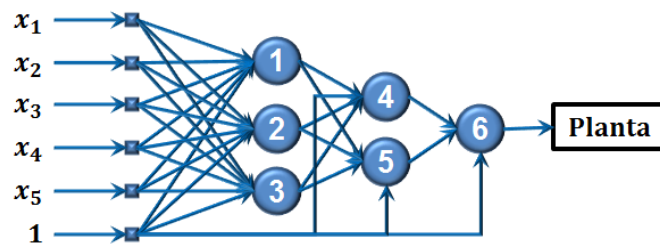


Figura 4.23 – Numeração de uma rede de seis neurônios

Durante a realização do ajuste dos pesos de cada RN pelo AG, eles foram ordenados em um vetor, sendo que o primeiro valor corresponde ao peso da entrada x_1 do neurônio 1. Assim, os primeiros seis valores correspondem aos pesos das entradas do neurônio 1, as quais são respectivamente: x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 e *bias*. Em seguida, estão dispostos os pesos do neurônio 2 na mesma ordem e assim sucessivamente, sendo que o peso correspondente ao *bias* é sempre o último de cada neurônio. Para a segunda e terceira camadas, é sempre respeitada a ordem da entrada do neurônio. Por exemplo, na camada 2 da rede de seis neurônios (Figura 4.23) tem-se que a primeira entrada do neurônio 4 é correspondente à saída do neurônio 1,

portanto o peso que corresponde a essa entrada é o primeiro do neurônio 4. A Tabela 4.2 apresenta a ordem do vetor de pesos para uma rede de seis neurônios.

Tabela 4.2 – Ordem do vetor de pesos para uma rede de seis neurônios

N° do neurônio	Entrada	Posição do peso no vetor
1	x_1	1
	x_2	2
	x_3	3
	x_4	4
	x_5	5
	<i>Bias</i>	6
2	x_1	7
	x_2	8
	x_3	9
	x_4	10
	x_5	11
	<i>Bias</i>	12
3	x_1	13
	x_2	14
	x_3	15
	x_4	16
	x_5	17
	<i>Bias</i>	18
4	Saída do Neurônio 1	19
	Saída do Neurônio 2	20
	Saída do Neurônio 3	21
	<i>Bias</i>	22
5	Saída do Neurônio 1	23
	Saída do Neurônio 2	24
	Saída do Neurônio 3	25
	<i>Bias</i>	26
6	Saída do Neurônio 4	27
	Saída do Neurônio 5	28
	<i>Bias</i>	29

Depois de definidas as estruturas das RNs, elas foram implementadas no modelo desenvolvido no Simulink® (Figura 4.21). Em seguida, foi realizado o ajuste dos pesos das redes neurais a partir do AG. Os critérios de desempenho para o *overshoot*, *settling time* e integral do erro absoluto adotados para o ajuste foram todos iguais a zero, buscando obter o melhor desempenho possível no controle. Assim, o critério de parada adotado para o AG foi a convergência. O tempo de teste foi definido em 10 segundos e o critério adotado para o

cálculo do *settling time* foi de 2%. O *setpoint* foi definido em 0,125 (equivalente a 1.000 rpm). O tempo de amostragem utilizado foi de 10 ms.

Em seguida, foi feita a seleção da melhor RN para o controle de rotação da UPPA3. Essa seleção foi feita levando em consideração não apenas o seu desempenho no controle, mas também o número de parâmetros que devem ser ajustados, já que quanto maior esse número, maior é a dificuldade enfrentada pelo AG no ajuste. Um requisito mínimo adotado foi que a oscilação do sinal de saída do sistema ficasse inferior a 5% depois que a vazão nominal começasse a variar, ou seja, a partir do instante de tempo de 3 segundos conforme Figura 4.18.

Por fim, foi inserido um controlador PID no lugar do controlador neural, visando fazer um comparativo entre os seus respectivos desempenhos. O ajuste do controlador PID foi realizado, primeiramente, sem variação da vazão nominal, ou seja, ela foi mantida em 100% durante todo o processo de ajuste pelo AG. Dessa forma, buscou-se seguir o procedimento que geralmente é executado em um ajuste PID comum, onde o controlador é ajustado em vazio, ou seja, sem distúrbio ou variação de torque. Em seguida, o controlador PID ajustado foi inserido no sistema com distúrbio, visando, assim, avaliar o efeito da variação de torque no seu desempenho. Depois disso, foi feito um novo ajuste onde, dessa vez, foi utilizada a mesma variação de vazão nominal que foi considerada no ajuste das RNs para que seus desempenhos pudessem ser comparados nas mesmas condições.

4.4.2. Identificação da Planta

Para a obtenção dos dados de entrada e saída do sistema de rotação da UPPA3 foi construído um experimento de identificação que explorasse toda a sua faixa operacional. Para isso, a válvula direcional proporcional que aciona o motor hidráulico foi submetida a diversos níveis de abertura durante a coleta dos dados. Isso foi feito visando obter o máximo de informações sobre o sistema.

O experimento de identificação foi realizado em malha aberta, ou seja, sem o controlador e sem realimentação dos sinais de saída do sistema (considerando a Figura 4.15). Além de coletar os dados de entrada e saída, foram coletados também os valores de vazão nominal na válvula ao longo do experimento. O tempo de amostragem utilizado nesse experimento foi de 17 ms, que é o tempo de ciclo mínimo permitido pelo CLP.

O experimento de identificação foi realizado com o motor hidráulico em vazio, ou seja, com torque mínimo. Dessa forma, teoricamente não haveria variação da vazão nominal, já

que o torque permanece sempre constante. Para resolver esse problema, uma das possibilidades seria desenvolver um dispositivo que provocasse uma variação de torque no motor hidráulico durante o experimento. Porém, esse método é mais difícil e trabalhoso e, dependendo do dispositivo construído, pode até mesmo gerar riscos à segurança do equipamento e do operador.

Como descrito anteriormente, uma variação no torque provoca uma variação na vazão nominal da válvula. Então, para simular o efeito do torque, é necessário apenas variar essa vazão nominal, sendo que ela é função da diferença de pressão por aresta da válvula, conforme descrito na seção 4.1.

Conforme mostrado na seção 4.1, o sistema hidráulico de rotação da UPPA3 possui uma bomba de vazão variável. Assim, considerando o esquema apresentado na Figura 4.16, ao invés de aumentar a diferença de pressão no motor hidráulico (" Δp_m "), o que seria provocado por um aumento de torque, optou-se por reduzir a pressão na linha que alimenta a válvula (" P ") através da variação da vazão da bomba. Dessa forma, com o torque constante, a diferença de pressão no motor hidráulico se mantém constante, porém a pressão de alimentação varia, fazendo com que a diferença de pressão por aresta da válvula (" Δp ") também varie, consequentemente alterando sua vazão nominal.

Para exemplificar, considerando o esquema da Figura 4.16, que a pressão original de alimentação do sistema (" P ") seja de 310 bar e que a diferença de pressão no motor hidráulico (" Δp_m ") seja zero, correspondendo ao torque zero, tem-se uma diferença de pressão por aresta da válvula (" Δp ") de 155 bar. Dessa forma, de acordo com a equação 4.1, inicialmente tem-se a vazão nominal (" Q_x ") máxima igual a 1.002,2 l/min. Reduzindo-se a pressão " P " para 150 bar, tem-se que " Δp " passa a valer 75 bar, fazendo com que Q_x passe a valer 697 l/min. Considerando a equação 4.26, para que fosse obtido Q_x igual a 697 l/min utilizando a pressão de entrada " P " original (310 bar) seria necessário um torque de 318 N.m. Por isso, nessa última condição pode-se dizer que foi simulado um torque de 318 N.m.

Dessa forma, o objetivo foi simular uma variação de torque durante o processo de identificação apenas variando a vazão da bomba. Uma das limitações desse método é a velocidade de resposta da bomba, já que ela é mais lenta, impossibilitando a simulação de uma variação rápida de torque, que é o que acontece em um ensaio de reparo por atrito real. Para ter uma ideia da velocidade de resposta, para que a vazão seja levada de seu valor máximo até zero a bomba leva aproximadamente cinco segundos.

No CLP, o sinal de comando para a válvula direcional proporcional do sistema de rotação na faixa de 0 a 1 corresponde à faixa de abertura da mesma de 0 a 100%. Para o sinal de saída do sistema (valor de rotação) foi feita uma parametrização, de forma que a faixa de 0 a 2.000 rpm correspondesse à faixa de 0 a 1 durante a identificação. Isso foi feito porque o controlador que foi implementado no CLP possui essas características, ou seja, sinais entrada e de saída entre 0 e 1.

Para que posteriormente a planta identificada pudesse ser implementada no Simulink® utilizando um modelo de sistema de controle similar ao adotado para o teste das RNs (Figura 4.21), foi necessário realizar o tratamento dos dados obtidos. Considerando a Figura 4.24, que mostra o modelo considerado no processo de identificação, para obter o sinal de saída da planta, é necessário realizar a divisão do sinal já parametrizado da saída do sistema (rotação na faixa de 0 a 1) pelo de vazão nominal em l/min, que também foi medido ao longo do processo. Assim, através desse resultado e do sinal de entrada utilizado durante o experimento, pôde ser realizada a identificação da planta que entraria no mesmo lugar da planta da Figura 4.21 durante o ajuste da rede neural.

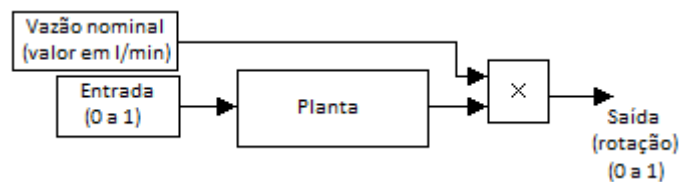


Figura 4.24 – Modelo utilizado na identificação do sistema de rotação

O modelo da planta escolhido para o processo de identificação consiste em uma função não linear em série com uma função de transferência, conforme Figura 4.25. A função não linear utilizada é mostrada na equação 4.33, onde “a”, “b”, “c” e “d” são as constantes do modelo que devem ser ajustadas.

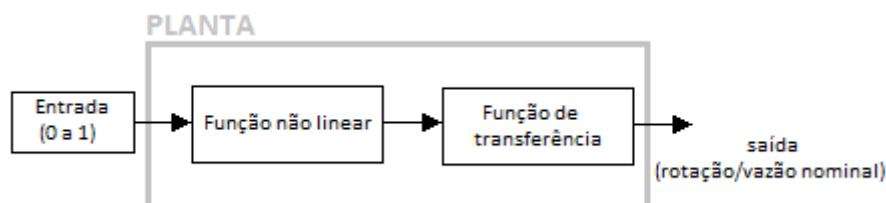


Figura 4.25 – Modelo da planta utilizado no processo de identificação do sistema de rotação

$$f_{nl}(u) = \frac{a}{1 + e^{-c \times u + d}} - b \quad (4.33)$$

Como pode ser visto na equação 4.33, foi escolhida uma função do tipo sigmoide com um *offset*. Foi escolhida uma função desse tipo porque, como pode ser visto na Figura 4.26, a resposta da válvula (obtida a partir do seu manual) para um determinado sinal de entrada não é perfeitamente linear, mas apresenta uma leve característica de uma curva sigmoide.

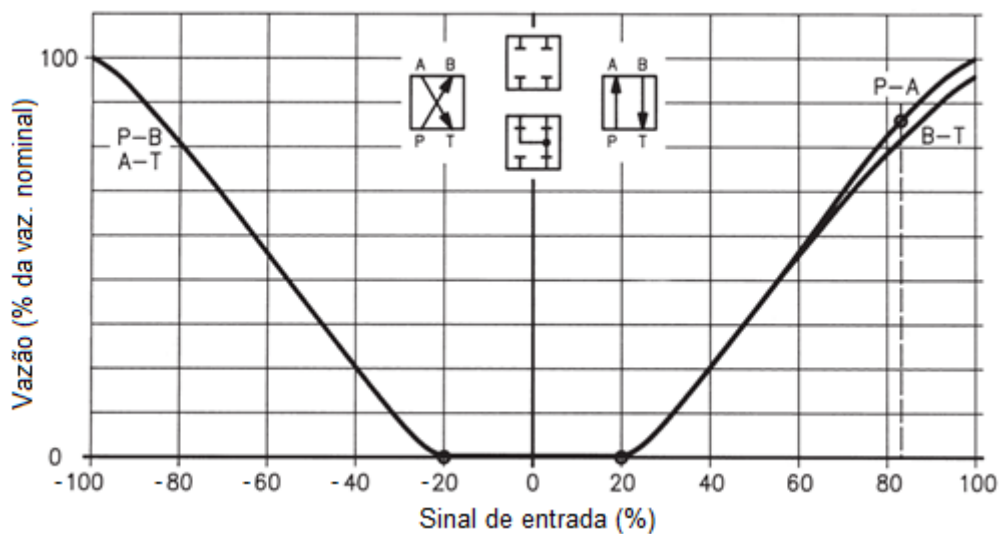


Figura 4.26 – Resposta em vazão da válvula do sistema de rotação da UPPA3 em função do sinal de entrada (BOSCH REXROTH AG, 2005)

A primeira etapa na identificação da planta foi a obtenção das constantes da função não linear. Para isso, a partir dos resultados obtidos de saída da planta (rotação dividida pela vazão nominal) no experimento, foram selecionados os dados onde a saída estava estabilizada. Em seguida, foi construída uma matriz em que a segunda coluna corresponde ao valor de saída da planta enquanto esta estava estabilizada e a primeira corresponde ao respectivo valor de entrada. Essa matriz foi denominada matriz de rotação estável.

Na sequência, foi construído no Matlab® um programa para calcular o erro quadrático entre a saída real e a resposta da função não linear através da matriz de rotação estável e para um determinado conjunto de valores das constantes “a”, “b”, “c” e “d”. O primeiro requisito adotado para a função não linear foi de que os pontos de menor e maior valor de saída da planta real que pertencem à matriz de rotação estável deviam corresponder exatamente aos do modelo não linear. Isso foi feito para que o modelo obtido não extrapolasse os valores máximo e mínimo da planta real. Dessa forma, a partir da equação 4.33 pode ser obtido o

sistema da equação 4.34, onde foi considerado que o ponto de menor valor de saída da planta corresponde à zero, cujo respectivo valor entrada também é zero, o que seria equivalente à válvula estar completamente fechada. Já o ponto de maior valor da saída está representado por y_{nr} , cujo valor é o obtido na matriz de rotação estável e u_{nr} é seu respectivo valor de entrada.

$$\begin{cases} f_{nl}(0) = \frac{a}{1 + e^d} - b = 0 \\ f_{nl}(u_{nr}) = \frac{a}{1 + e^{-c \times u_{nr} + d}} - b = y_{nr} \end{cases} \quad (4.34)$$

Manipulando o sistema da equação 4.34, podem ser obtidos diretamente os valores das constantes “a” e “b” em função das constantes “c” e “d” a partir das equações 4.35 e 4.36.

$$a = -y_{nr} \times (1 + e^d) + \frac{1}{1 + e^{-c \times u_{nr} + d}} \quad (4.35)$$

$$b = \frac{a}{1 + e^d} \quad (4.36)$$

Portanto, o problema de otimização ficou reduzido ao ajuste das constantes “c” e “d”. Para obter o valor dessas constantes, foi utilizada a função “fminsearch” do Matlab®, a qual encontrou os valores utilizando o programa de cálculo do erro quadrático e valores iniciais das constantes iguais à zero. A função “fminsearch” do Matlab® utiliza o método simplex (LAGARIAS *et al.*, 1998) no processo de otimização da função objetivo que, nesse caso, foi o erro quadrático entre a saída real e a saída do modelo não linear.

Em seguida, os dados de entrada do experimento de identificação foram submetidos à função não linear para que pudessem ser obtidos os dados de entrada da função de transferência da planta, considerando o esquema da Figura 4.25. Por fim, para a identificação da função de transferência da planta do sistema de rotação, foi utilizado o MathWork’s System Identification Toolbox (SITB) do Matlab®. Foram testados modelos de função de transferência com um atraso e com até três polos e um zero e escolhido o que melhor representou o comportamento do sistema real.

4.4.3. Ajuste do Controlador

Depois de realizado o processo de identificação, o AG foi utilizado para ajustar a rede neural (que foi selecionada através do procedimento descrito na seção 4.4.1) no sistema de

controle do Simulink®. Para isso, tomou-se o cuidado de manter o mesmo tempo de amostragem do controlador do sistema de controle real, ou seja, 40 ms.

A planta obtida na identificação foi inserida no sistema de controle desenvolvido no Simulink®, mostrado na Figura 4.27. A diferença entre esse modelo e o que foi utilizado nos testes das RNs apresentadas na seção 4.4.1 é que a vazão nominal agora é inserida em l/min, já que o sistema considerado no processo de identificação utilizou esse princípio (Figura 4.24). Outra diferença é que, ao invés de ser realizado o controle de vazão, agora é realizado diretamente o controle de rotação (onde 0 a 1 corresponde à faixa de 0 a 2.000 rpm), já que no sistema real, esse é o objetivo. Além disso, a planta agora possui uma não linearidade, a qual influencia diretamente a resposta do sistema.

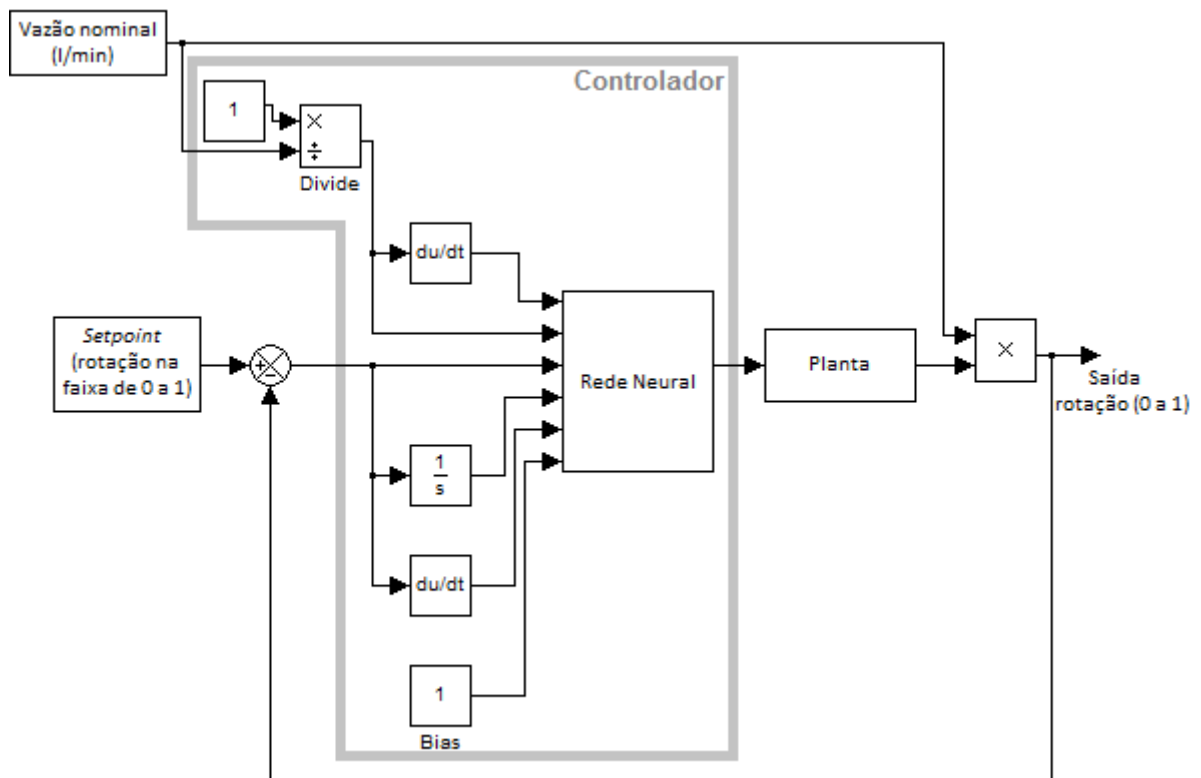


Figura 4.27 – Sistema de controle desenvolvido no Simulink® para o ajuste da RN onde a rotação na faixa de 0 a 1 corresponde à faixa de 0 a 2.000 rpm

A variação de vazão nominal adotada para os testes durante o processo de ajuste da RN no sistema de controle de rotação desenvolvido no Simulink® é apresentada na Figura 4.28 e tem seu valor de amplitude em função do tempo descrito pela equação 4.37. Pode ser

observado que foi considerado o valor real de vazão nominal máxima da UPPA3 que, como demonstrado anteriormente, é de aproximadamente 1.002,2 l/min.

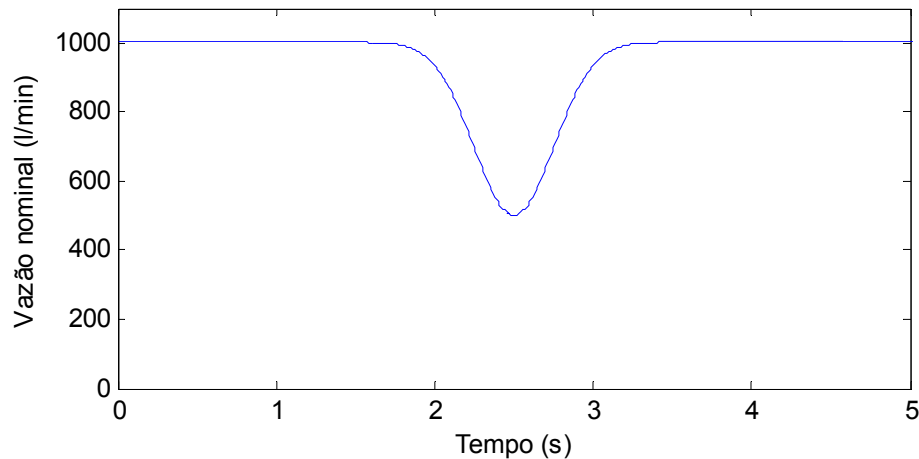


Figura 4.28 – Curva de vazão nominal utilizada durante o ajuste da RN no sistema de controle de rotação do Simulink®

$$Q_x(t) = 1002,2 \times \left(1 - 0,5 \times e^{-\frac{(t-2,5)^2}{0,125}}\right) \quad (4.37)$$

A partir da curva de vazão nominal da Figura 4.28, pode-se obter a curva de torque simulada durante o processo de ajuste utilizando a equação 4.26 apresentada na seção 4.4.1, a qual é mostrada na Figura 4.29.

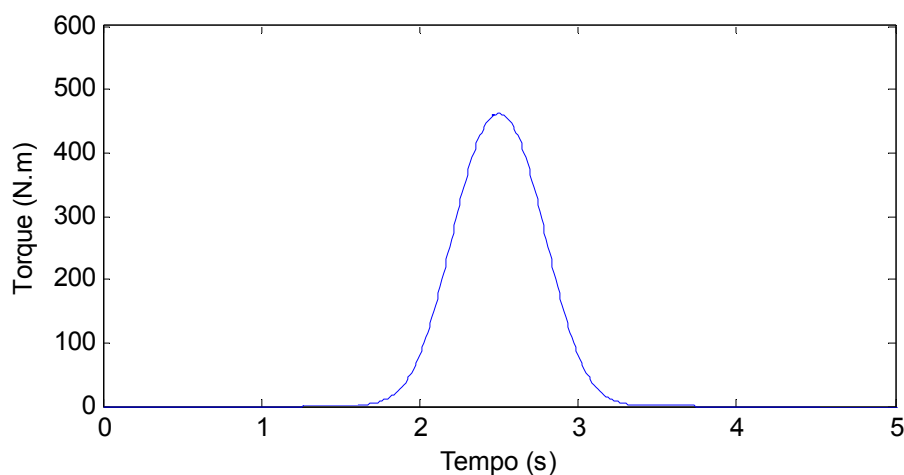


Figura 4.29 – Curva de torque simulada durante o ajuste da RN no sistema de controle de rotação do Simulink®

Pode ser observado na Figura 4.29 que o torque máximo simulado foi um pouco menor que o utilizado durante o projeto da RN na seção 4.4.1 (Figura 4.19). Porém, agora a variação é mais rápida, simulando uma condição mais crítica para o sistema.

Os critérios de desempenho para o *overshoot*, *settling time* e integral do erro absoluto definidos para o ajuste foram todos iguais a zero, tanto para o ajuste a partir do modelo do Simulink® quanto para o ajuste no sistema real, buscando obter o melhor desempenho possível no controle. Assim, o critério de parada adotado para o AG foi a convergência.

O *setpoint* utilizado no ajuste a partir do modelo do Simulink® foi de 0,5, o que é equivalente a 1.000 rpm, já que, como descrito anteriormente, a faixa de 0 a 1 da saída desse sistema corresponde à faixa de 0 a 2.000 rpm. Nesse ajuste, o tempo de teste foi definido em 5 segundos e o critério adotado para o cálculo do *settling time* foi de 2%.

Como mencionado anteriormente, a RN do CLP possui sinais de entrada e de saída limitados entre 0 e 1, porém os pesos podem ser definidos em qualquer valor, ou seja, não há restrições para eles.

Depois de realizado o ajuste da RN no modelo teórico, os valores dos pesos obtidos foram inseridos na RN do CLP para avaliar o seu desempenho no sistema de controle real.

Em seguida, o método da tentativa foi empregado no ajuste do sistema de controle de rotação real da UPPA3 para fornecer um intervalo viável para a criação da população inicial do AG que seria aplicado no sistema real caso o resultado obtido pelo ajuste no sistema do Simulink® não fosse satisfatório. Porém esse método só é aplicável a controladores PID.

Assim, nessa etapa, a RN do CLP foi substituída por um controlador PID e foi feito o ajuste a partir do método da tentativa. Depois, a RN foi inserida novamente no CLP e as constantes obtidas no controlador PID foram inseridas como pesos do neurônio 1 nas respectivas entradas de erro, integral do erro e derivada do erro. Em seguida, os outros pesos foram escolhidos de tal forma que a saída da RN fosse equivalente à do controlador PID obtido pelo método da tentativa. Para a RN de 1 neurônio com função de ativação linear, por exemplo, os pesos seriam atribuídos conforme Figura 4.30, onde K_p , T_i e T_d são as constantes do controlador PID.

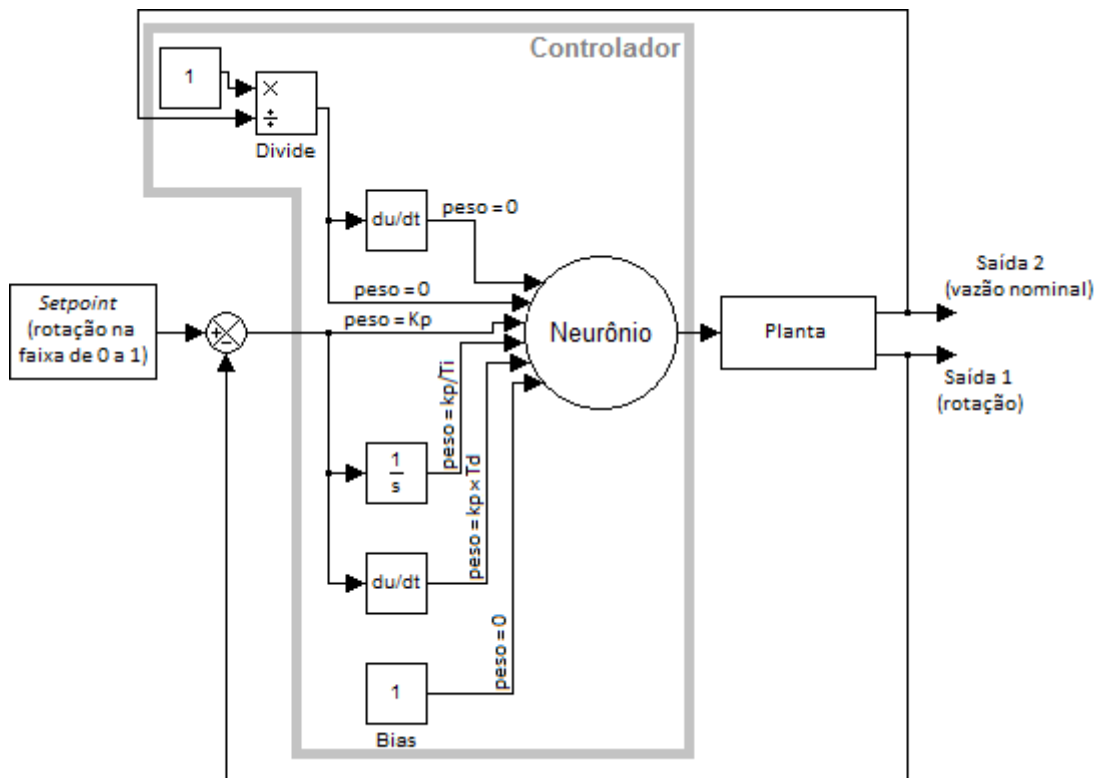


Figura 4.30 – Distribuição dos pesos obtidos no ajuste PID pelo método da tentativa na RN de 1 neurônio com função de ativação linear

Dessa forma, considerando a RN de um neurônio e função de ativação linear, o intervalo que seria definido para geração da população inicial do AG seria entre zero e o resultado do ajuste pelo método da tentativa para os pesos das respectivas entradas de erro, integral do erro e derivada do erro, e entre zero e o resultado do ajuste no modelo do Simulink® para os demais.

Em seguida, o ajuste foi realizado no sistema real através do AG. Como mencionado anteriormente, nesse ajuste, o AG envia cada indivíduo que ele deseja testar para um programa de teste desenvolvido no Labview®. Quando o AG envia um indivíduo para o programa de teste, o mesmo executa o procedimento descrito pelo fluxograma da Figura 4.31, que também descreve o procedimento executado pelo CLP.

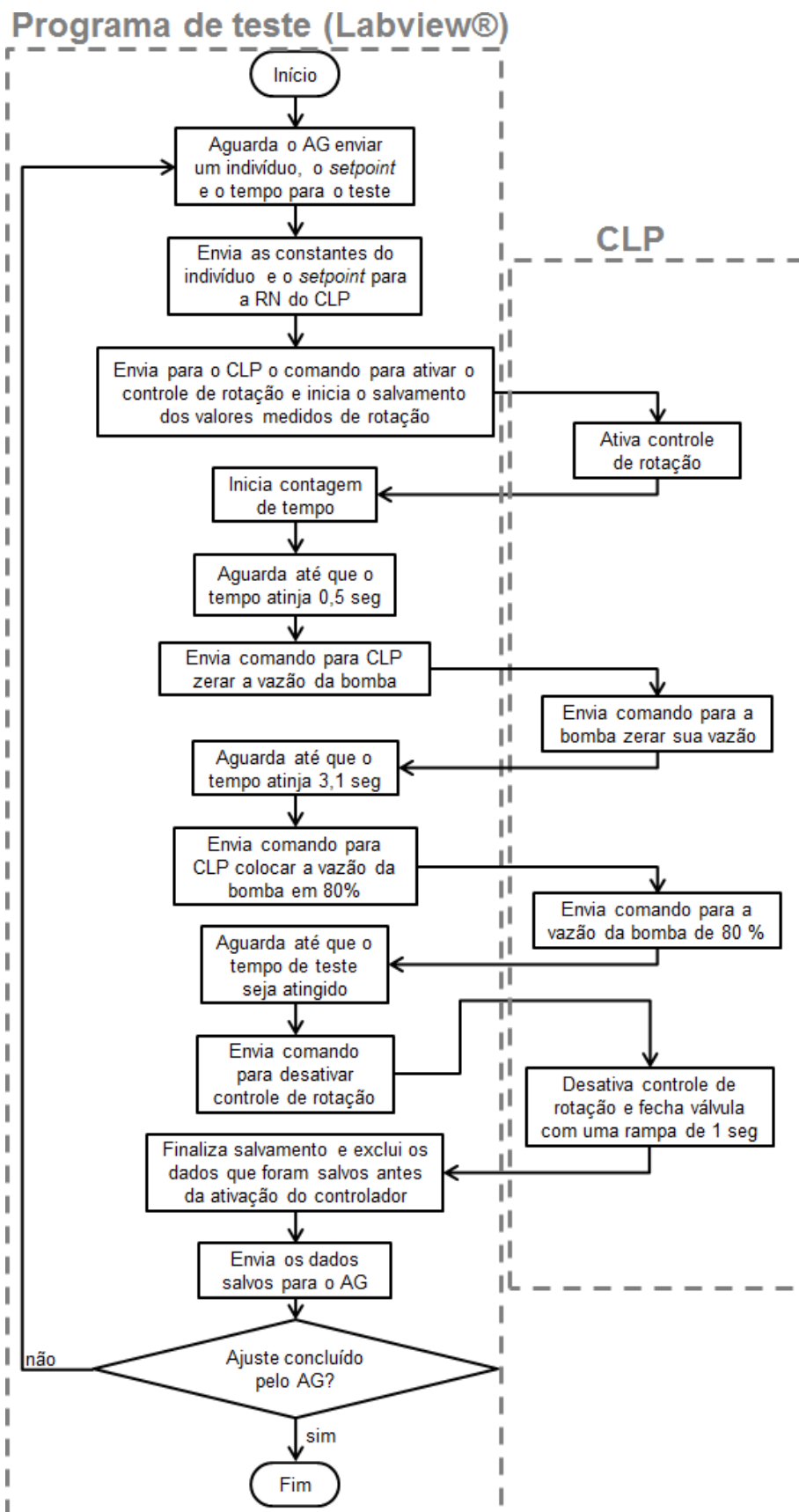


Figura 4.31 – Procedimento executado pelo programa de teste e pelo CLP no teste dos indivíduos do AG que realiza o ajuste da RN de controle de rotação utilizando o sistema real

Pode ser observado no fluxograma da Figura 4.31 que ao longo do tempo de teste de um determinado indivíduo o programa de teste envia comandos para variar a vazão da bomba. Como demonstrado anteriormente, isso foi feito para que a vazão nominal da válvula mudasse ao longo do tempo, simulando assim uma variação de torque. Pode ser observado ainda que em um determinado instante de tempo é enviado um comando para que a vazão da bomba atinja zero, porém isso não acontece. A vazão não chega à zero porque, como mencionado anteriormente, devido à resposta lenta da bomba, o tempo necessário para que isso aconteça é de aproximadamente cinco segundos e o tempo que esse comando fica ativado é de apenas 2,6 segundos.

No início do teste de cada indivíduo, a vazão da bomba está em 80%. Os valores de tempo para o envio de comandos de mudança da vazão da bomba (0,5 e 3,1 s) foram definidos a partir de testes. Nesses testes, foi observado qual seria a redução na vazão nominal da válvula direcional proporcional com a redução da vazão da bomba e o motor hidráulico em rotações próximas de 800 rpm, já que o objetivo era que esse fosse o *setpoint* utilizado durante o ajuste. Para isso, com o sistema hidráulico pressurizado, a válvula direcional proporcional foi sendo aberta lentamente até que a rotação ficasse próxima de 800 rpm. Em seguida, foram enviados comandos para a variação da vazão da bomba e foi observado o tempo de resposta e a vazão nominal que era atingida durante esse tempo. O objetivo principal era conseguir no menor tempo possível uma variação de vazão nominal da válvula que simulasse uma variação de torque de pelo menos 300 N.m.

Também pode ser observado no fluxograma da Figura 4.31 que ao desativar o controle de rotação a válvula direcional proporcional é fechada com uma rampa de um segundo, ou seja, a partir desse instante a abertura da válvula direcional proporcional é levada de seu valor atual até zero em um segundo utilizando uma curva do tipo rampa. Isso foi feito para reduzir os golpes de aríete na linha do sistema hidráulico que, como mencionado anteriormente, podem danificar o equipamento.

O *setpoint* utilizado no ajuste a partir do sistema real foi de 0,4, o que é equivalente a 800 rpm. O tempo de teste foi definido em 7 segundos e o critério adotado para o cálculo do *settling time* foi de 5%. Dessa vez, foi definido o critério de 5% porque o sistema de medição de rotação possui resolução de 25,4 rpm, o que já é mais de 3% do *setpoint*, sendo assim o critério de 2% seria inviável.

Durante o ajuste a partir do sistema real a “mutação maior” utilizada pelo AG foi a que obtém um multiplicador aleatório entre 0 e 2. Isso foi feito porque nessa etapa já se conhecia

os sinais (positivo ou negativo) dos pesos da RN, que foram obtidos pelo ajuste no modelo teórico.

Por fim, as constantes do indivíduo que obteve melhor desempenho, de acordo com o procedimento de ajuste do AG no sistema real, foram implementadas na RN presente no CLP da UPPA3.

4.5. Sistema Antitravamento

Sabe-se que, durante o processo de reparo por atrito, quanto maior a força aplicada maior é a demanda de torque. Além disso, sabe-se também que, pelas características do processo apresentadas na seção 2.1, a maior demanda de torque acontece na fase inicial do reparo.

Quando o torque aumenta durante o processo de reparo por atrito, a rotação tem a tendência de reduzir seu valor. Com a rotação menor, a geração de calor pelo processo também é menor, fazendo com que os materiais do pino e do bloco que estão sendo processados tenham sua temperatura reduzida, conseqüentemente aumentando sua resistência. Ao aumentar a resistência do material, o torque também aumenta, e esse processo em cadeia faz com que a situação fique cada vez mais crítica e que o travamento aconteça de forma muito rápida e com mínimas chances de recuperação do sistema de rotação. Com isso, o sistema antitravamento deve possuir uma resposta muito rápida para interromper o processo de travamento já no seu início.

Como mencionado anteriormente, o controle de força da UPPA3 é realizado a partir de uma válvula direcional proporcional, a qual, por suas características construtivas, é adequada para o controle de vazão. Portanto, na UPPA3, a pressão no cilindro hidráulico, que é diretamente proporcional à força, é controlada a partir do controle de vazão de óleo que é transferido para o mesmo.

O sistema antitravamento desenvolvido e implementado na UPPA3 consiste em desativar o controlador PID de força e fechar a válvula direcional proporcional de controle do cilindro quando for detectada uma redução significativa de rotação, impedindo assim que o cilindro avance. Essa redução de rotação não pode ser muito grande, porque, se for muito grande, pode ocorrer de o sistema de rotação não ter mais a capacidade de se recuperar, já que, como descrito anteriormente, o processo de travamento é muito rápido. Quando a rotação

se reestabelece, o controlador PID de força volta a atuar, continuando o ciclo de onde ele havia parado anteriormente, ou seja, a parte integral do controlador volta com o mesmo valor de quando ele foi desativado pelo sistema antitravamento.

Assim, o sistema antitravamento foi projetado para atuar interrompendo o fluxo de óleo para o cilindro a partir do momento em que a rotação atingir um valor menor que 100 rpm abaixo do *setpoint*. Dessa forma, se o *setpoint* é de 1.500 rpm, por exemplo, o sistema antitravamento será acionado quando a rotação atingir um valor menor que 1.400 rpm, e será desativado, fazendo com que o controlador PID de força volte a atuar, quando a rotação for superior a esse valor.

Como mencionado anteriormente, a resolução do sistema de medição de rotação da UPPA3 é de 25,4 rpm, o que impede a utilização de um valor de erro menor que esse como critério para a ativação do sistema antitravamento. Além disso, foi definido um valor de erro de 100 rpm para que a detecção seja a mais rápida possível, mas também deixando uma pequena margem para que a RN possa tentar reestabelecer a rotação antes que o sistema antitravamento tenha que atuar.

4.6. Realização de Ensaios de Reparo por Atrito

A etapa final desse trabalho é a realização de ensaios de reparo por atrito para validar o novo sistema desenvolvido. Para que se pudesse realizar esses ensaios, devido à reestruturação de todo o sistema de controle da UPPA3, foi necessária a construção de um novo programa supervisor. Esse programa foi construído para realizar a interface entre o operador e a UPPA3 de forma que nele pudessem ser inseridos os parâmetros de ensaio e que ele pudesse salvar e informar, em tempo real, todos os dados importantes. O programa supervisor é responsável também por realizar a comunicação com o CLP e enviar para ele todos os parâmetros de ensaio.

Para a realização de um ensaio de reparo por atrito na UPPA3, o programa supervisor foi construído de forma que devem ser informados os seguintes parâmetros: rotação, força e comprimento de queima do primeiro estágio, força e comprimento de queima do segundo estágio (apenas para o ensaio com dois estágios) e força e tempo de forjamento. Os parâmetros que são salvos e informados pela interface do programa durante o ensaio são: força, rotação, comprimento de queima e torque.

Depois de construído o programa supervisorio, foram realizados os ensaios para avaliação do desempenho do novo sistema de controle implementado e para definir a nova faixa operacional da UPPA3, como será mostrado no capítulo seguinte. Vislumbrando os diferentes níveis de força que seriam utilizados, foram definidas três geometrias de pino e bloco para a realização dos ensaios de reparo por atrito, sendo que a Figura 4.32 mostra a geometria “A”, cujos diâmetros do pino e do furo são os menores, a Figura 4.33 mostra a geometria “B”, cujos diâmetros são intermediários e a Figura 4.34 mostra a geometria “C”, cujos diâmetros são os maiores. Nesse caso, quanto maior o diâmetro, maior é a resistência do pino e, portanto, maiores são as forças que podem ser aplicadas. Assim como as geometrias utilizadas por Borges (2011), Moura (2011) e Gontijo (2012), estas foram definidas com base nos resultados obtidos por Pires (2007), que, em seu trabalho, avaliou o efeito da geometria na qualidade do reparo.

Inicialmente, foram realizados ensaios nas condições em que o sistema de controle anterior também era capaz de realizar, com o intuito de avaliar o que mudou em relação ao desempenho no controle dos parâmetros força e rotação. Em seguida, foram realizados ensaios em condições críticas, com elevadas forças e baixas rotações, buscando sempre obter os valores limites desses parâmetros para a garantia de execução completa do reparo com o novo sistema de controle.

Assim, depois de obtida a nova faixa operacional do equipamento, ela foi comparada com a anterior, mostrada na seção 2.2 e que foi obtida através dos trabalhos de Borges (2011), Moura (2011) e Gontijo (2012).

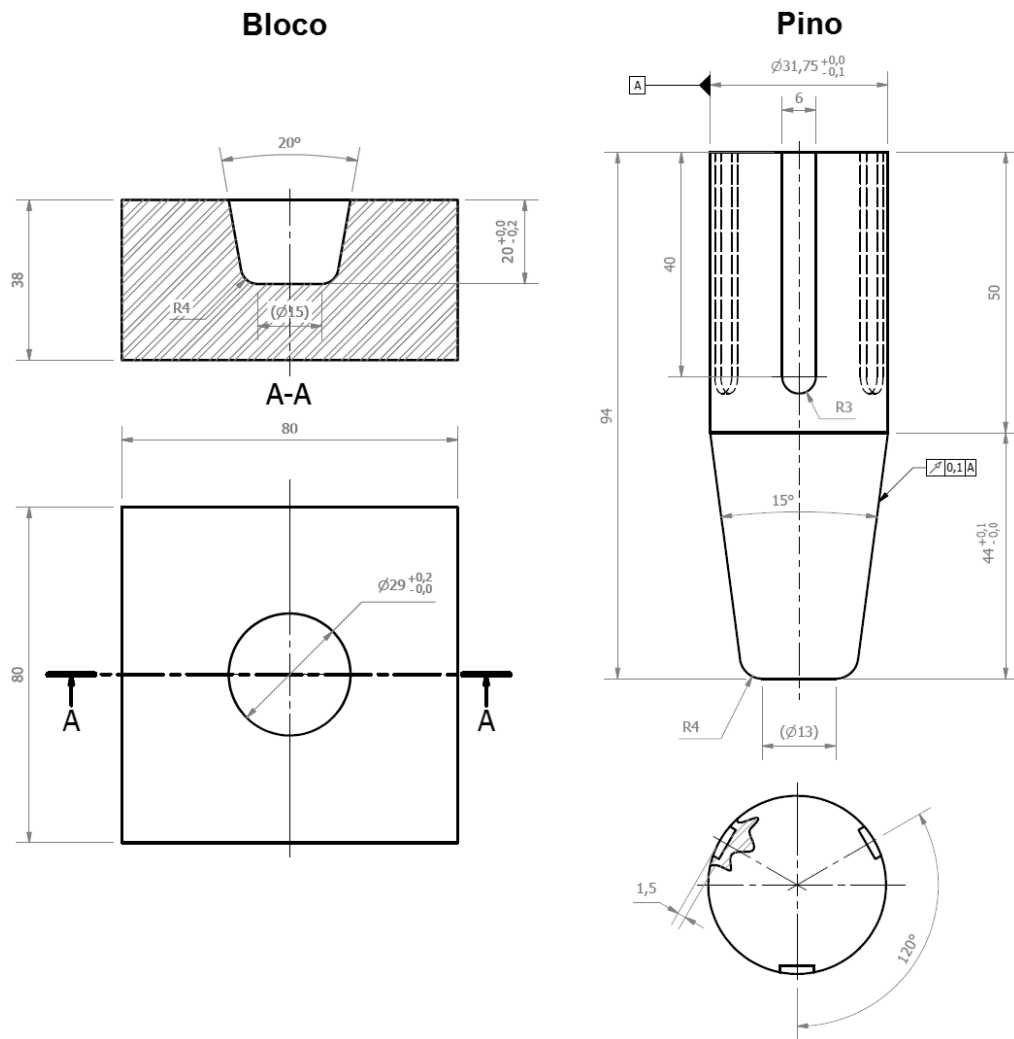


Figura 4.32 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “A” (cotas em mm)

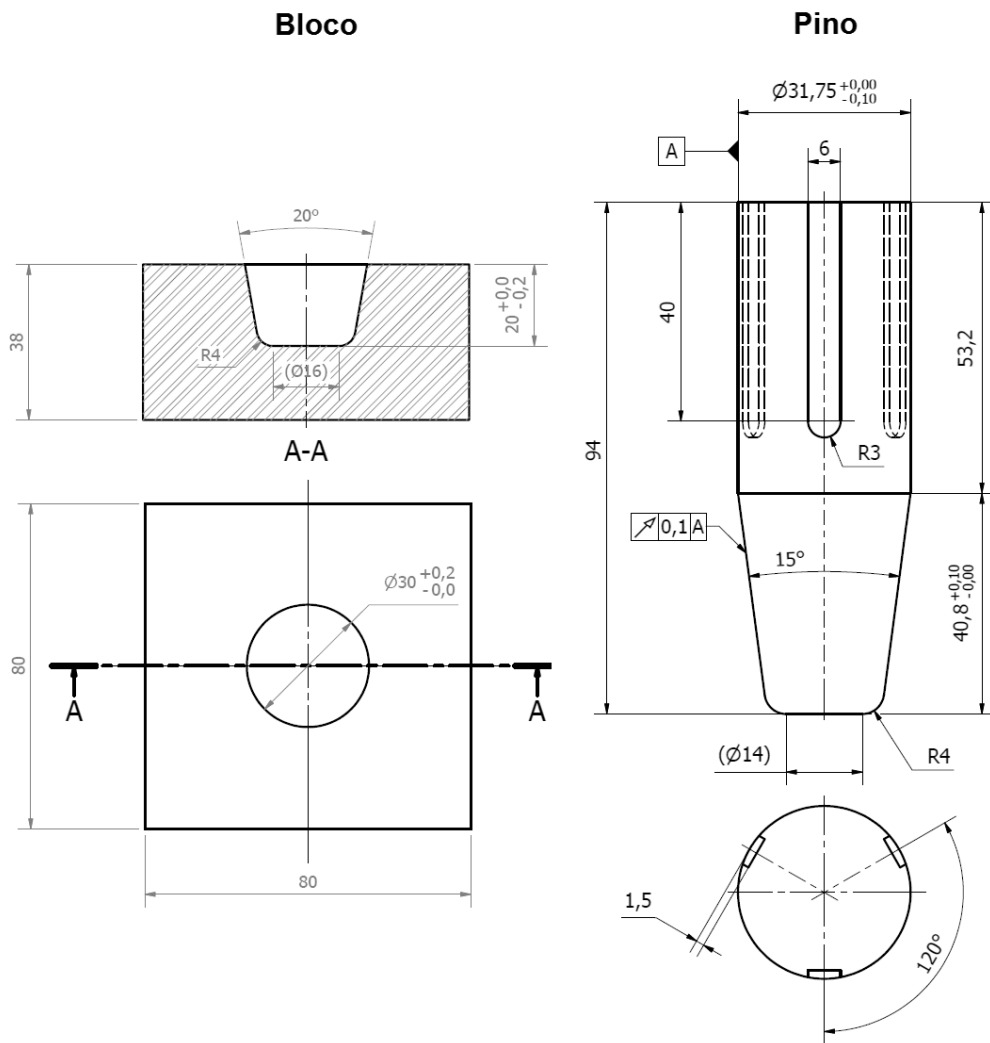


Figura 4.33 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “B” (cotas em mm)

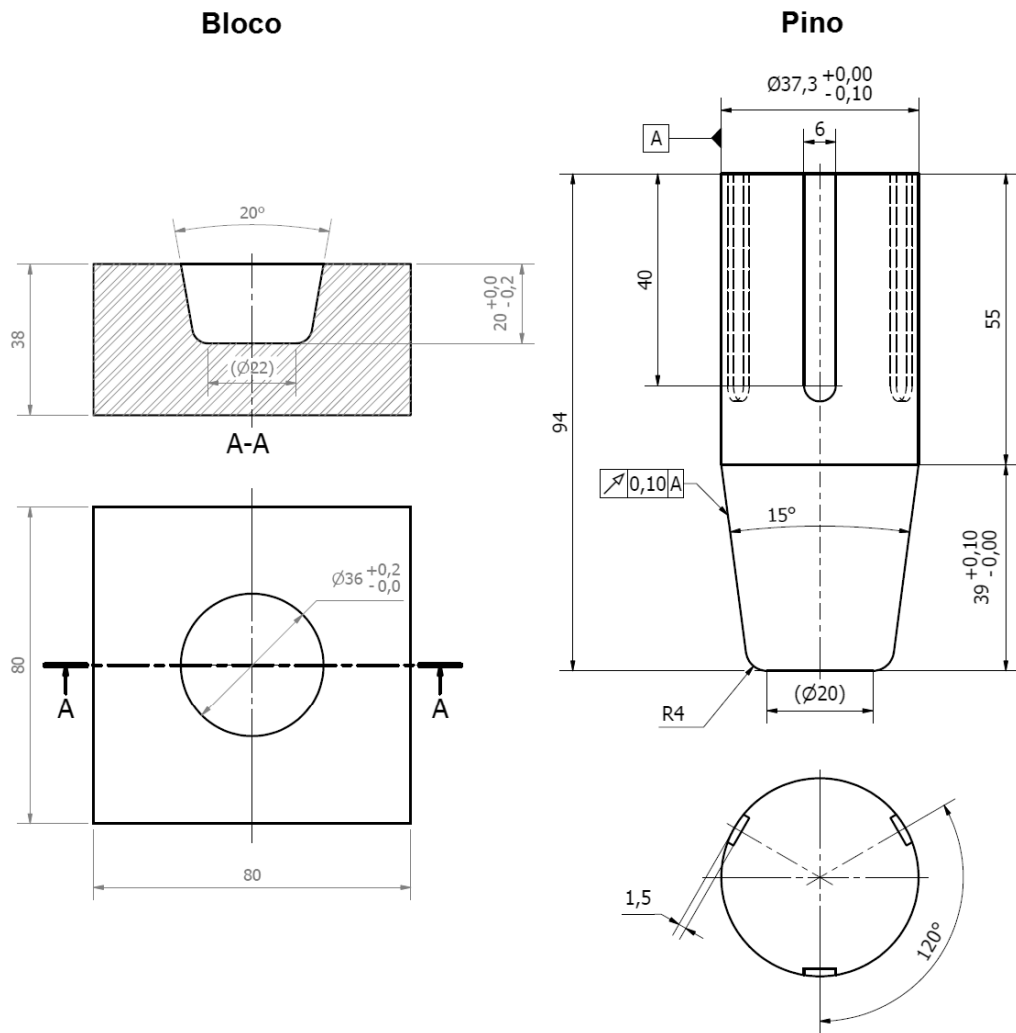


Figura 4.34 – Dimensões do pino e do bloco da geometria “C” (cotas em mm)

CAPÍTULO V

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na reestruturação do sistema de controle da UPPA3, no ajuste dos parâmetros de desempenho do AG, no projeto da rede neural para o controle de rotação, nas identificações, no ajuste dos controladores e nos ensaios de reparo por atrito para a validação do novo sistema. Por fim, é feita a comparação dos desempenhos da UPPA3 antes e após a implementação das novas metodologias desenvolvidas nesse trabalho.

5.1. Reestruturação do Sistema de Controle

Como mencionado na seção 4.1, para otimizar o controle de força e rotação da UPPA3 o primeiro passo foi a reestruturação do respectivo sistema, eliminando do circuito os itens desnecessários e implementando os controladores no CLP.

5.1.1. Reestruturação Física

Na reestruturação física, foram retirados do circuito os cartões PID, o subtrator e os conversores, e foram instalados dois novos transdutores de pressão, visando a obtenção do valor de vazão nominal da válvula do sistema de rotação. A Figura 5.1 mostra a estrutura do novo sistema de controle de força e rotação da UPPA3.

Pode ser observado que em relação à configuração anterior, apresentada na seção 4.1, o sistema ficou mais simples, pois todos os dispositivos foram ligados ao CLP, que passou a ser o responsável por todas as funções de tratamento e conversão dos sinais. Além disso, cada

dispositivo retirado do sistema possuía uma determinada incerteza associada ao processo de conversão. Removendo esses conversores, as respectivas incertezas simplesmente foram eliminadas.

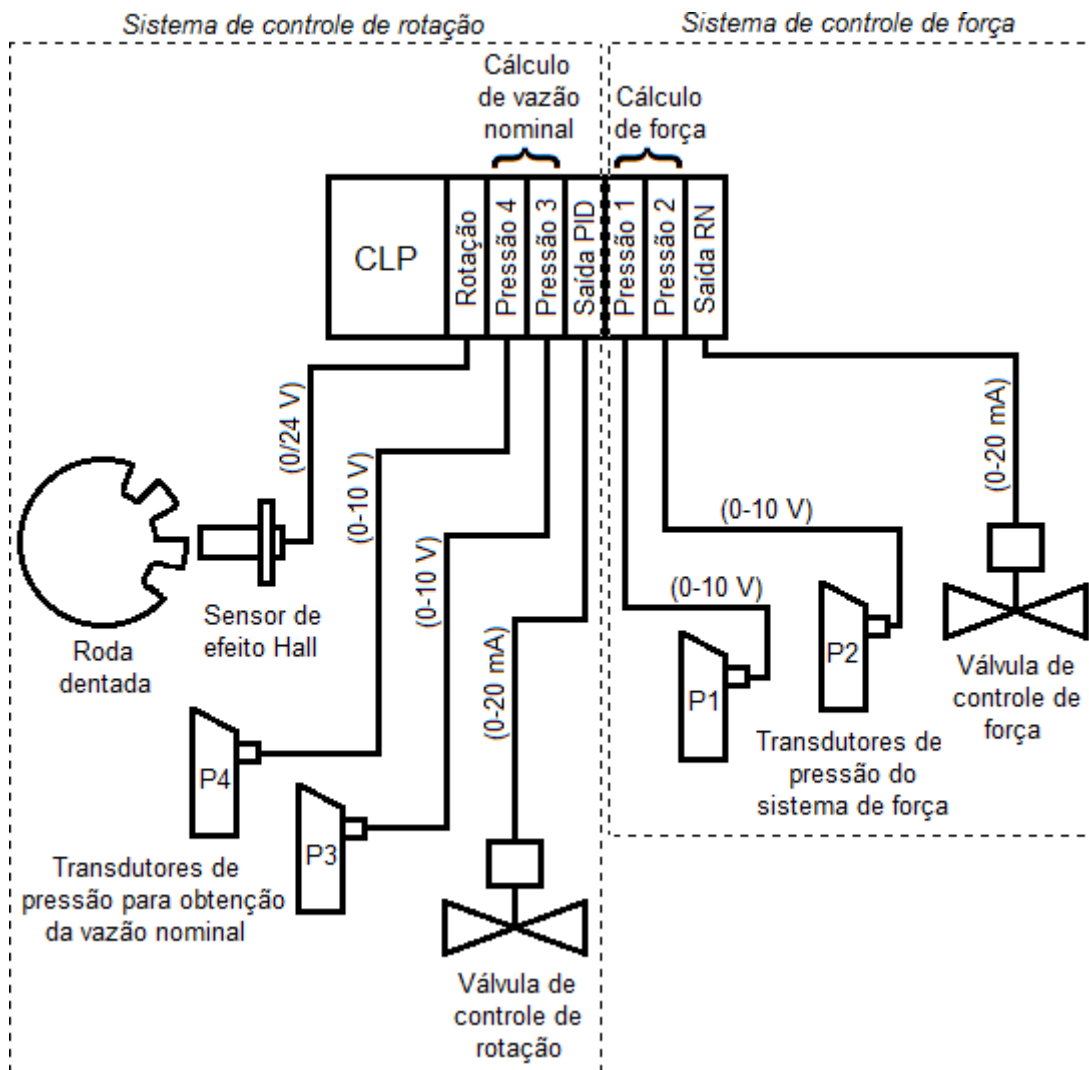


Figura 5.1 – Estrutura física do novo sistema de controle de força e rotação da UPPA3

5.1.2. Desenvolvimento do Programa para o CLP

Após a reestruturação física do sistema, para que o CLP pudesse tratar os dados dos sensores e realizar todas as funções de controle, foi desenvolvido um novo programa. Quando as bombas dos sistemas de força e rotação estão ativadas e o sistema de rotação está pressurizado (conforme descrito na seção 4.1), o programa desenvolvido para o CLP executa a lógica descrita no diagrama Grafcet da Figura 5.2.

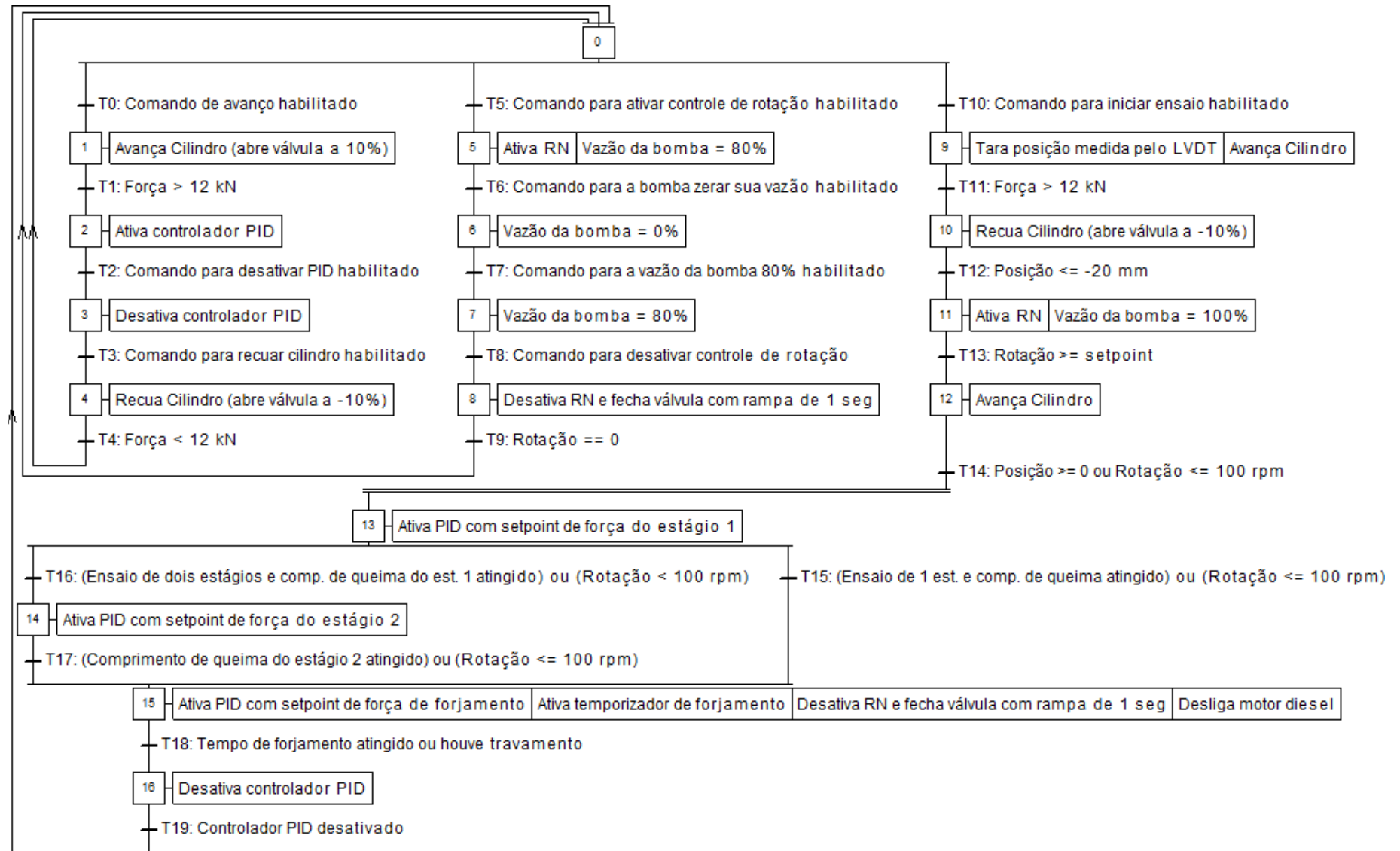


Figura 5.2 – Digrama Grafset do programa desenvolvido para o CLP da UPPA3

Na Figura 5.2, o primeiro ciclo do diagrama Grafset, composto pelas etapas 1, 2, 3 e 4, é utilizado durante o ajuste do controlador PID de força através do sistema real, e corresponde ao procedimento descrito pelo fluxograma da Figura 4.14, apresentado na seção 4.3.2. Já o segundo ciclo, composto pelas etapas 5, 6, 7 e 8, é utilizado durante o ajuste da RN através do sistema real, correspondendo ao processo descrito pelo fluxograma da Figura 4.31, apresentada na seção 4.4.3. O último ciclo, que corresponde às etapas restantes, é responsável por realizar o ensaio de reparo por atrito depois que o programa supervisor, que foi desenvolvido no Labview®, envia os parâmetros de ensaio para o CLP, via comunicação OPC, e ativa o comando para iniciar o ensaio.

É importante ressaltar que no início do ajuste da RN (Rede Neural) através do sistema real a vazão da bomba do sistema de rotação é colocada em 80% pelo programa de teste e antes de serem iniciados os ensaios de reparo por atrito ela é colocada em 100% pelo programa supervisor.

Durante a realização do ensaio de reparo por atrito, a etapa 9 do diagrama da Figura 5.2 corresponde ao avanço do cilindro para identificar a posição zero do comprimento de queima. Essa posição corresponde àquela onde há o primeiro contato entre pino e bloco, sendo que, nesse caso, ela é identificada quando a força atinge 12 kN, como pode ser visto no diagrama, fazendo com que seja acionada a próxima etapa.

Na etapa 10, o cilindro é recuado 20 mm para que o sistema de rotação não seja acionado com o pino em contato com o bloco. Em seguida, na etapa 11, o sistema de rotação é ativado. Quando a rotação de ensaio é atingida, a etapa 12 é acionada e o cilindro começa a avançar até que haja o contato entre pino e bloco, demarcado pela posição zero. A partir desse momento, se houver uma parada do motor hidráulico, detectada quando a rotação fica abaixo de 100 rpm, antes que o comprimento de queima seja atingido, o ensaio é interrompido e as etapas subsequentes são passadas rapidamente, pois, nesse caso, houve o travamento.

A partir do momento em que a etapa 13 é ativada, o programa do CLP executa o procedimento descrito na seção 2.2 para a realização do ensaio de reparo por atrito caso não haja o travamento do motor hidráulico. Quando a RN é desativada, o motor diesel é desligado, pois para iniciar um novo ensaio é necessário realizar a montagem e o alinhamento do pino e do bloco, o que é um pouco demorado. Assim, durante esse procedimento não é interessante que o motor diesel fique ligado apenas consumindo combustível.

Quando a RN e o controlador PID estão ativados, o sistema antitravamento também é acionado e executa o procedimento descrito na seção 4.5 durante o ensaio.

5.2. Ajuste dos Parâmetros de Desempenho do AG

Conforme descrito na seção 4.2, a primeira etapa executada para o ajuste dos parâmetros de desempenho do AG foi a escolha de uma configuração inicial dos mesmos e, em seguida, a escolha de configurações que se diferenciam em apenas um dos parâmetros cada. Na Tabela 5.1 é mostrada a configuração inicial escolhida (C1) e as configurações auxiliares (C2-C7), as quais serviram para avaliar a influência de cada parâmetro na convergência do AG.

Tabela 5.1 – Configurações utilizadas para o teste de convergência do AG

Configurações	Quantidade na Reinserção	Número de Filhos	Mutações (% dos filhos)	
			Maiores	Menores
C1 (referência)	20	30	30	30
C2	30	20	30	30
C3	10	40	30	30
C4	20	30	50	30
C5	20	30	10	30
C6	20	30	30	50
C7	20	30	30	10

Para todas as configurações, a população inicial foi sorteada em um intervalo entre 0 e 100, ou seja, os valores das constantes K_p , K_i e K_d gerados inicialmente estão dentro desse intervalo. O valor do *setpoint* adotado para os testes foi 10, enquanto os valores adotados para a saturação mínima e máxima do sinal de controle são, respectivamente, 0 e 10^6 .

Depois de alguns testes com a configuração “C1”, foram definidos, como requisitos de desempenho para o sistema controlado, *overshoot* de 2%, *settling time* de 5 s com critério de 2% e um número máximo de gerações igual a 20. Foram escolhidos esses requisitos porque durante os testes observou-se que, dentro desses limites, algumas vezes há convergência, mas nem sempre ela ocorre, ou seja, depois de várias execuções do AG, em uma determinada parte dessas execuções, esses requisitos são atingidos com até 20 gerações.

Foi definido um número pequeno de gerações para a convergência pensando no tempo que o AG irá gastar para realizar o ajuste dos controladores no sistema real da UPPA3. Se forem considerados, por exemplo, 50 testes por geração (já que este é o tamanho da população

do AG e cada indivíduo deve ser testado no sistema de controle), e cada teste levando cerca de 7 s, o AG irá gastar quase duas horas para executar as 20 gerações. Durante todo esse tempo, a unidade hidráulica deverá permanecer ligada e, devido a problemas de aquecimento do óleo hidráulico da mesma, um tempo maior pode danificar o equipamento devido ao superaquecimento.

Depois de realizadas as 100 execuções com cada uma das configurações, foi observado quais as variações nos parâmetros de desempenho que traziam benefícios para o AG em termos de convergência. A porcentagem de convergência obtida por cada configuração, ou seja, a quantidade de vezes que o AG conseguiu atingir os requisitos de desempenho para o sistema de controle com no máximo 20 gerações, é mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Convergência obtida para o AG com as configurações de C1 a C7

Configurações	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Convergência (%)	43	32	61	47	38	44	41

Pode ser observado na Tabela 5.2 que as configurações que obtiveram o melhor desempenho no ajuste, ou seja, tiveram maior convergência, em relação à configuração C1, foram a C3, a C4 e a C6. De acordo com a Tabela 5.1, essas configurações correspondem, respectivamente, a um aumento de: número de filhos (necessariamente reduzindo a quantidade na reinserção já que o tamanho da população total é 50), quantidade de “mutações maiores” e “quantidade de mutações menores”. Porém, com o aumento e diminuição das “mutações menores”, as mudanças foram menos significativas do que com a variação dos demais parâmetros.

Assim, a análise dos efeitos dos parâmetros no desempenho do AG leva à escolha de configurações que possuem maior número de filhos e quantidade de “mutações maiores”. Dessa forma, foram criadas duas novas configurações que seguem esses princípios, apresentadas na Tabela 5.3.

As novas configurações, apresentadas na Tabela 5.3, foram testadas e depois das 100 execuções com cada uma, foram obtidas as convergências de 65% para “C8” e 75% para “C9”. Assim, por ter obtido melhor desempenho, foi escolhida a configuração “C9” como sendo a definitiva para AG. A Tabela 5.4 apresenta a configuração geral definitiva do AG.

Tabela 5.3 – Novas configurações criadas para o AG a partir da análise dos efeitos dos parâmetros de desempenho

Configurações	Quantidade na Reinserção	Número de Filhos	Mutações (% dos filhos)	
			Maiores	Menores
C8	10	40	50	30
C9	10	40	75	12,5

Tabela 5.4 – Configuração definitiva do AG

Tipo de reinserção	Reinserção ordenada	Quantidade de reinseridos	10
Método de seleção para <i>crossover</i>	<i>Ranking</i>		
Tipo de <i>crossover</i>	Recombinação intermediária		
Número de filhos por geração	40		
Quantidade de “mutações maiores”	75% dos filhos		
Quantidade de “mutações menores”	12,5% dos filhos		

5.3. Controle de Força

Como mencionado na seção 4.3, a identificação da planta do sistema foi a primeira etapa executada para que, em seguida, pudesse ser realizado o ajuste do controlador PID de força através do AG.

5.3.1. Identificação da Planta

Como descrito na seção, 4.3.1, para obter os dados de entrada e saída da planta do sistema de força da UPPA3, a respectiva válvula foi submetida a diversos níveis de abertura. A Figura 5.3 apresenta o sinal utilizado para a abertura da válvula em função do tempo e a Figura 5.4 mostra a respectiva curva de força obtida, onde, como descrito anteriormente, a faixa de -0,5 a 0,5 corresponde à faixa de abertura de -100% a 100% no caso do sinal de entrada e a faixa de 0 a 1 de 0 a 400 kN para o sinal de saída.

Pode ser observado na Figura 5.3 que os valores de abertura da válvula utilizados foram bem pequenos, de no máximo 10%. O controle de força da UPPA3, como mencionado anteriormente, é realizado a partir do controle de vazão com essa válvula, sendo que uma

vazão muito pequena já é suficiente para gerar um aumento significativo de força em um pequeno intervalo de tempo, como pode ser observado pelo gráfico da resposta na Figura 5.4.

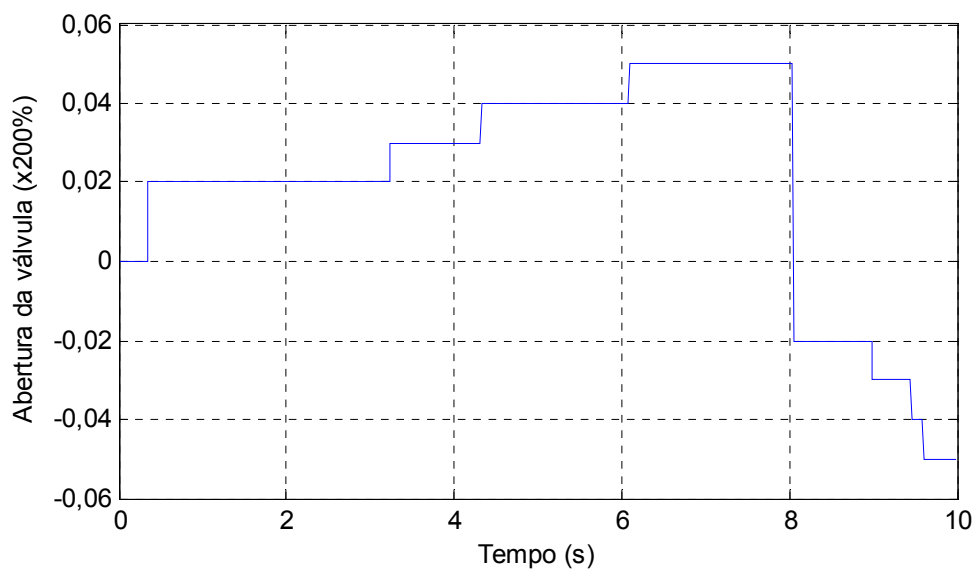


Figura 5.3 – Sinal de entrada da válvula utilizado no experimento de identificação da planta do sistema de força

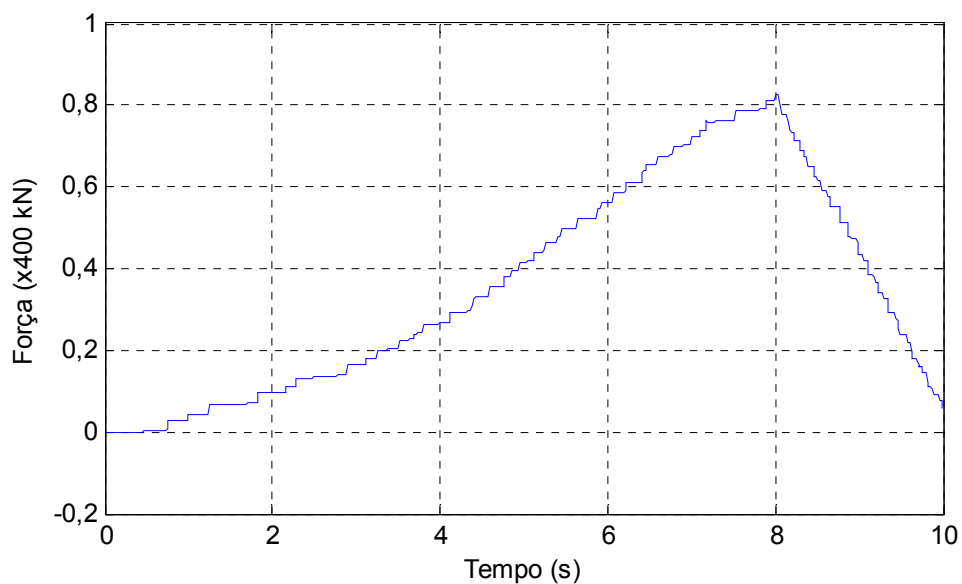


Figura 5.4 – Sinal de saída obtido no experimento de identificação da planta do sistema de força

Depois de testados os modelos de função de transferência mencionados na seção 4.3.1, a partir dos dados de entrada e saída obtidos no experimento e do MathWork's System Identification Toolbox (SITB) do Matlab®, o modelo que melhor representou a planta do sistema de força da UPPA3 foi o descrito pela equação 5.1. Utilizando a curva de entrada apresentada pela Figura 5.3, as respostas obtidas pelo sistema real e pela função de transferência obtida a partir da identificação podem ser comparadas na Figura 5.5.

$$G_{\text{força}}(s) = \frac{1,6384 \times (1 + 9,792s)}{s \times (1 + 1,8007s)} \quad (5.1)$$

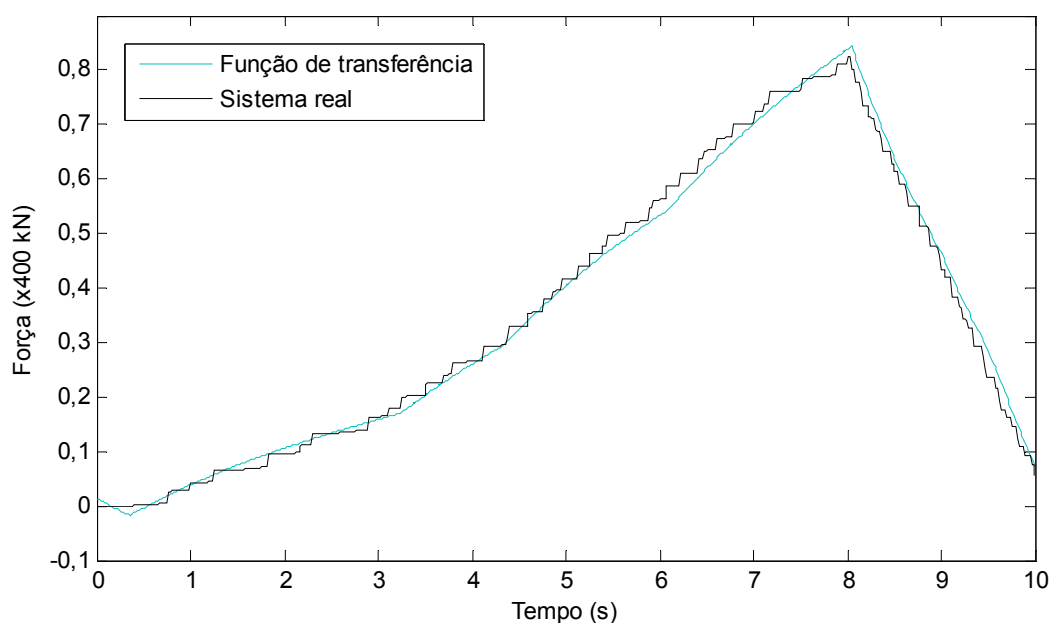


Figura 5.5 – Sinal de saída do sistema real e da função de transferência obtida na identificação

Pode ser observado na equação 5.1 que não foi identificado atraso na planta. Isso acontece porque a válvula do sistema de força possui tempo de resposta de 10 ms (BOSCH REXROTH AG, 2003) e o tempo de amostragem utilizado para o experimento de identificação foi 17 ms. Considerando o tempo de resposta da válvula, o ideal seria que no experimento de identificação fosse utilizado um tempo de amostragem menor, de pelo menos 2 ms, para que se pudesse coletar pelo menos 5 pontos durante esse tempo de resposta. Assim, a identificação seria mais confiável, já que o momento da transição da válvula poderia ser mais bem identificado. Porém, isso não foi possível devido à limitação do tempo de ciclo do CLP e pela indisponibilidade de um sistema de aquisição de maior velocidade na UPPA3.

Além disso, o ajuste do controlador utilizando a função de transferência identificada tem apenas o objetivo de obter uma faixa inicial das constantes para posterior utilização na criação da população inicial do AG durante o ajuste utilizando o sistema real.

Assim, apesar dessas ressalvas, a função de transferência da equação 5.1 foi utilizada para representar matematicamente a planta de força da UPPA3.

5.3.2. Aplicação do AG na Planta Identificada

Depois da identificação, o AG foi utilizado para ajustar o controlador PID na planta teórica a partir do sistema de controle desenvolvido no Simulink®, descrito na seção 4.3.2. Os valores iniciais das constantes do controlador (população inicial do AG) foram todos gerados aleatoriamente na faixa entre zero e um. A convergência do AG ocorreu com 80 gerações. A Figura 5.6 mostra o resultado final desse ajuste no controle da planta do Simulink®, onde o *setpoint* de 0,25 corresponde a 100 kN. Nesse ajuste, as constantes obtidas para K_p , K_i e K_d foram, respectivamente, 1,2534, 0,7026 e zero. Já os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%), *overshoot*, integral do erro absoluto e nota *fuzzy* foram, respectivamente, 0,3 s, 0,92%, 9,88 kN.s e 83,36.

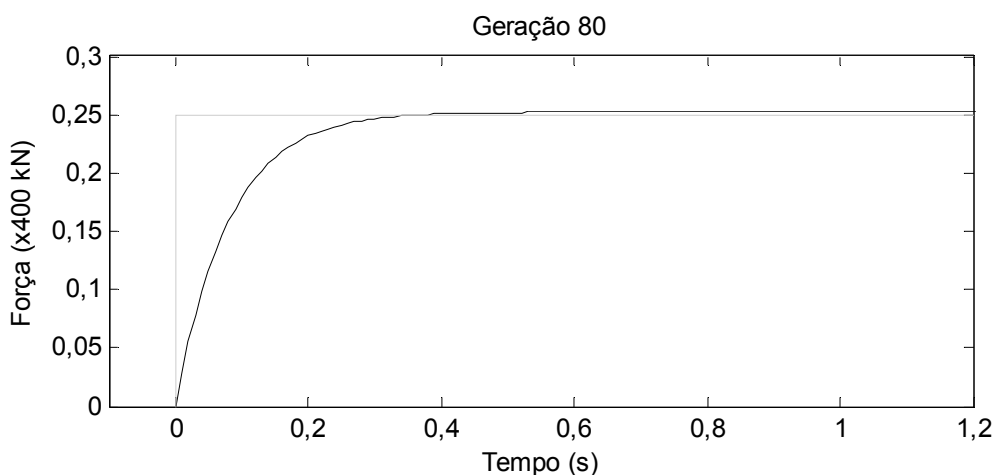


Figura 5.6 – Resultado do ajuste PID realizado pelo AG no controle de força da planta do Simulink®

O indivíduo que obteve o melhor desempenho no ajuste do AG através da planta teórica (mostrado na Figura 5.6) foi implementado no controlador PID do CLP. O desempenho obtido no controle do sistema real pode ser visto na Figura 5.7. Nessa figura, observa-se que para o *setpoint* de 30 kN não pôde ser obtido um erro em regime permanente

menor que 5%. Já para o *setpoint* de 70 kN, considerando o critério de 5%, foi possível obter um *settling time* de aproximadamente 1,4 s e um *overshoot* de 10,3%.

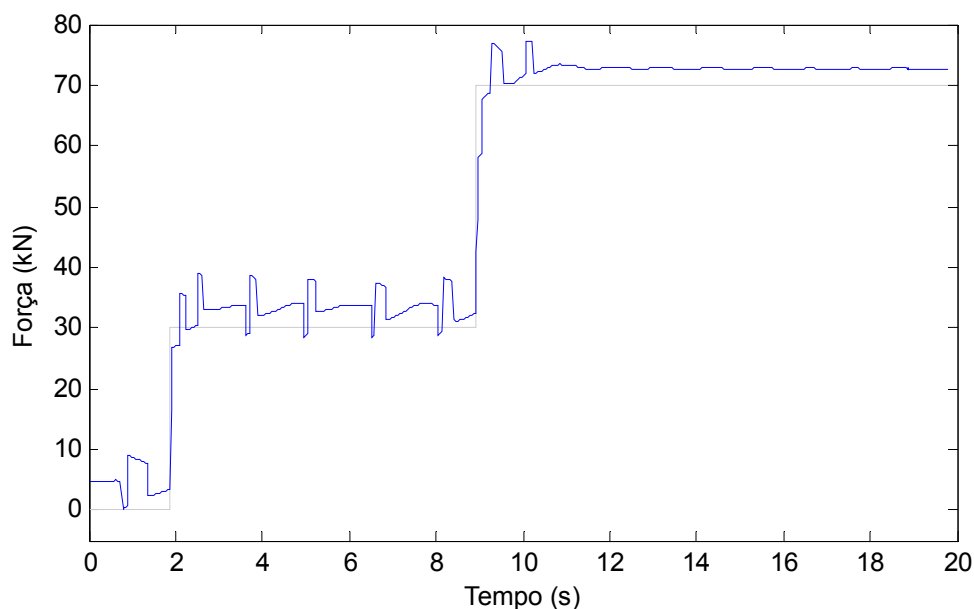


Figura 5.7 – Resposta obtida pelo controlador PID, ajustado através do AG e utilizando a planta do Simulink®, quando implementado no sistema real de controle de força da UPPA3

Pode-se observar que os desempenhos no controle da planta teórica e da planta real foram muito diferentes. Isso aconteceu porque o modelo teórico não consegue representar de forma exata o comportamento do sistema real devido à quantidade de variáveis envolvidas neste último como, por exemplo, temperatura do óleo e atrito nos mancais, à presença de não linearidades que não foram consideradas e às dificuldades relatadas na seção 5.3.1 durante o processo de identificação.

5.3.3. Aplicação do AG na Planta Real

Depois do ajuste utilizando o modelo teórico e do teste do respectivo resultado no sistema real, foi a vez do AG realizar o ajuste utilizando diretamente o sistema real de controle de força da UPPA3. Para isso, as constantes da população inicial do AG foram geradas aleatoriamente dentro da faixa de zero a 1,2534 para K_p , de zero a 0,7026 para K_i e de zero a 0,001 para K_d , utilizando o resultado obtido no ajuste através do modelo teórico, exceto para K_d , para que este não fosse estabelecido diretamente em zero optou-se por inicia-lo em um valor bem pequeno. O número de gerações executado foi de 30. Na Figura 5.8 é

apresentado o resultado final desse ajuste no controle da planta real, onde o *setpoint* utilizado foi de 50 kN. Nesse ajuste, as constantes obtidas para K_p , K_i e K_d foram, respectivamente, 3,5221, 0,3260 e 0,0003. Já os valores obtidos de *settling time* (critério de 5%), *overshoot*, integral do erro absoluto e nota *fuzzy* foram, respectivamente, 0,06 s, 3,04%, 8,4021 kN.s e 59,55.

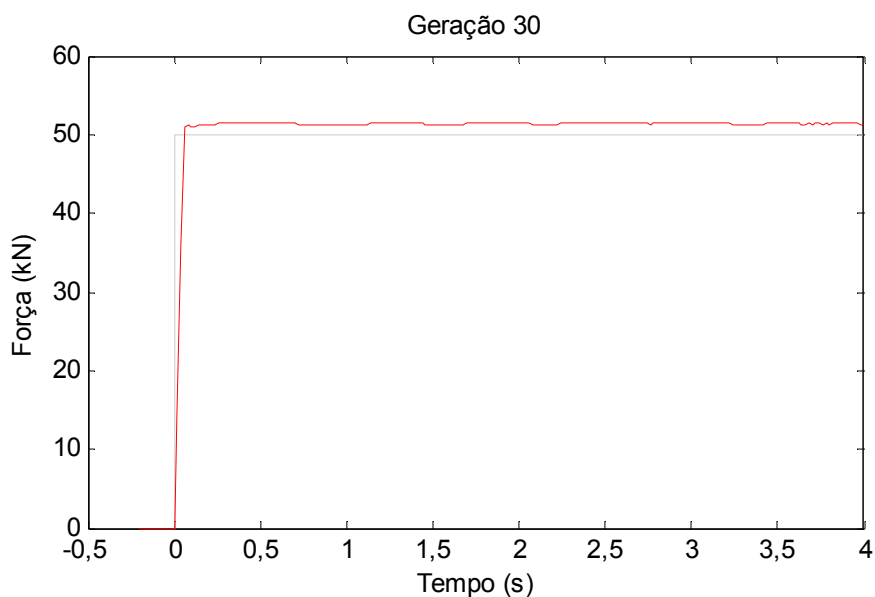


Figura 5.8 – Resultado do ajuste PID realizado pelo AG no sistema real de controle de força da UPPA3

Com o resultado obtido pelo ajuste através da planta real, mostrado na Figura 5.8, pode ser observado que houve uma melhora no desempenho do sistema de controle quando comparado com o resultado obtido pelo ajuste através do modelo teórico mostrado na Figura 5.7. Isso aconteceu porque o modelo teórico, ou seja, a função de transferência obtida a partir do processo de identificação não consegue representar de forma exata o comportamento do sistema real. Utilizando o sistema real, todas as não linearidades e variáveis que influenciam o processo, muitas das quais não se tem controle, são consideradas durante o ajuste pelo AG, o que faz com que este obtenha melhor desempenho e promova um controle mais robusto para o sistema.

Por fim, as constantes do indivíduo que obteve o melhor desempenho no controle de força da UPPA3, obtidas no ajuste do AG através do sistema real, foram implementadas definitivamente no controlador PID presente no CLP.

5.4. Controle de Rotação

Como mencionado na seção 4.4, para realizar o controle de rotação, primeiramente foi projetado um controlador do tipo rede neural. Em seguida, foi feita a identificação da planta do sistema rotação, a qual foi utilizada no ajuste, através do AG, dos pesos da rede neural. Depois, o método da tentativa foi empregado no ajuste do sistema de controle real e, por fim, o AG utilizou esse mesmo sistema para o ajuste definitivo do controlador. Os resultados obtidos em todas essas etapas são mostrados a seguir.

5.4.1. Projeto do Controlador

Como descrito na seção 4.4.1, depois de definidas as estruturas das RNs, elas foram implementadas no modelo desenvolvido no Simulink®. Em seguida, seus pesos foram ajustados a partir do AG. Para o ajuste de todas as RNs, os pesos da população inicial do AG foram gerados de forma aleatória na faixa de -1 a 1. O *setpoint* utilizando durante o ajuste de todas as RNs foi de 0,125 (equivalente a 12,5% da vazão nominal máxima considerada, o que corresponde a aproximadamente 1.000 rpm).

Para o ajuste da RN de um neurônio com função de ativação linear, o AG realizou 500 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.9, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio (simulação de torque) foram, respectivamente, 0,42 s, 1,92%, 30,4 l.s/min, 30,14 e 4,72%. A nota obtida foi baixa porque o AG considera o *settling time* como o instante de tempo a partir do qual não há mais variação superior a 2% na saída em relação ao *setpoint*, o que, por conta da simulação de torque, seria equivalente a 6,4 s nesse caso. Da mesma forma, o *overshoot* considerado pelo AG é correspondente ao máximo valor da saída durante toda a simulação, o que seria equivalente a 4,72%.

Pode ser observado na Figura 5.9 que, apesar da grande variação de torque que foi simulada durante o ajuste, mostrada na seção 4.4.1, o neurônio com função de ativação linear conseguiu responder de forma rápida o suficiente para que não houvesse uma grande variação de rotação. Como mencionado na seção 4.4.1, um requisito mínimo adotado foi que a oscilação do sinal de saída do sistema ficasse inferior a 5% depois que a vazão nominal começasse a variar, ou seja, a partir do instante em que começasse a ser simulada a variação

de torque. Portanto, como a RN de um neurônio com função de ativação linear conseguiu atender esse requisito, ela foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

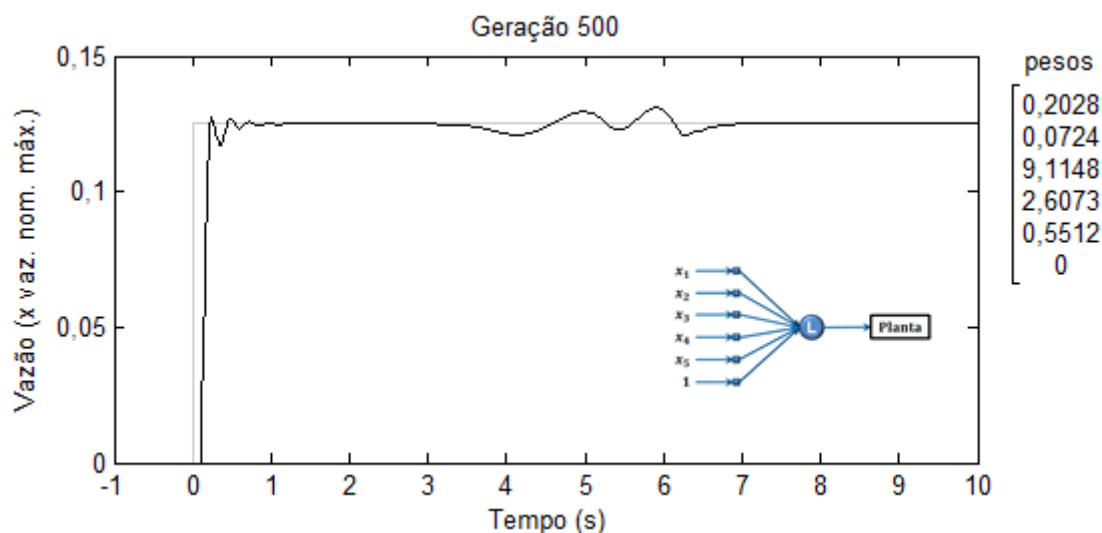


Figura 5.9 – Resultado do ajuste da RN de um neurônio com função de ativação linear na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Para o ajuste da RN de um neurônio com função de ativação sigmoide, o AG realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.10, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 0,42 s, 2,16%, 45,8 l.s/min, 62,11 e 9,36%.

Pode ser observado na Figura 5.10 que o neurônio com função de ativação sigmoide conseguiu responder de forma rápida o suficiente para que não houvesse uma variação muito grande de rotação. Porém, mesmo com o ajuste sendo feito com o dobro do número de gerações, ele foi menos efetivo que o neurônio com função de ativação linear. Além disso, a RN de um neurônio com função de ativação sigmoide não conseguiu manter a oscilação do sinal de saída do sistema abaixo de 5% durante a simulação do torque. Portanto, por não ter conseguido atender a esse requisito, ela não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

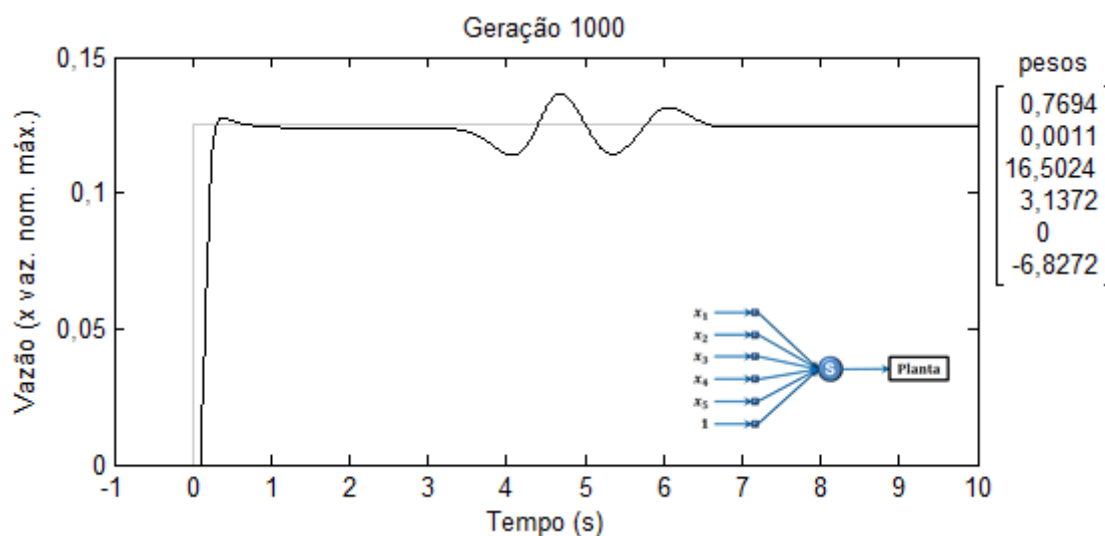


Figura 5.10 – Resultado do ajuste da RN de um neurônio com função de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Para o ajuste da RN de três neurônios com funções de ativação sigmoide o AG também realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.11, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 1,06 s, 1,76%, 86,2 l.s/min, 43,71 e 10,4%.

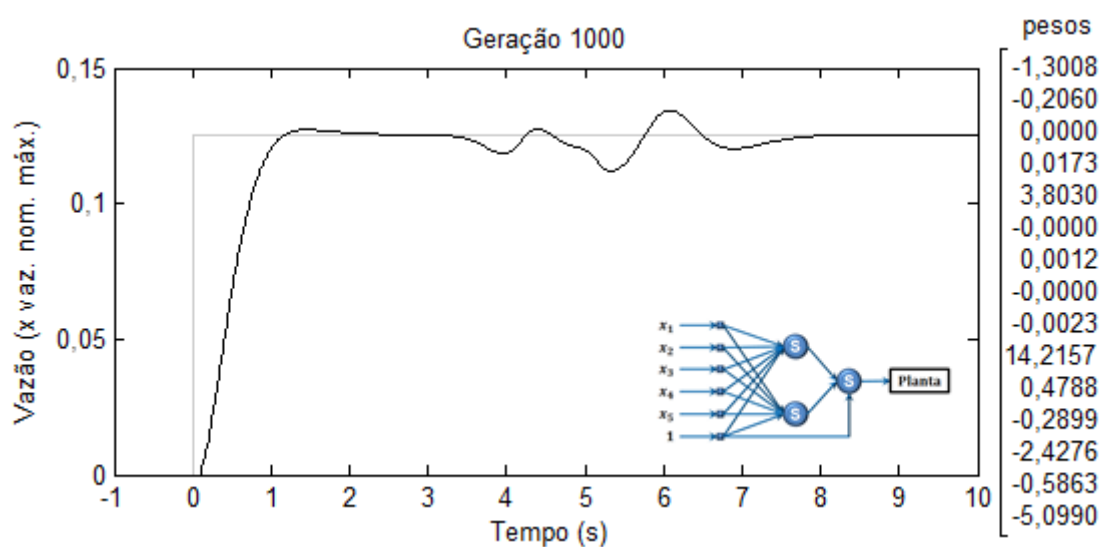


Figura 5.11 – Resultado do ajuste da RN de três neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Na Figura 5.11, pode ser observado que a RN de três neurônios com funções de ativação sigmoide conseguiu minimizar o efeito do torque que foi simulado, porém, mesmo com o ajuste sendo feito com o dobro do número de gerações, ela foi bem menos efetiva que a RN de um neurônio com função de ativação linear. Além disso, a RN de três neurônios obteve uma oscilação do sinal de saída bem maior do que os 5% requeridos durante a simulação do torque. Portanto, por não ter conseguido atender a esse requisito, ela também não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

Como mencionado na seção 4.4.1, quanto maior o número de parâmetros a serem ajustados, maior é a dificuldade enfrentada pelo AG no seu ajuste. Assim, como a RN de três neurônios possui uma maior quantidade de pesos que devem ajustados do que a RN de um neurônio, talvez com um número maior de gerações ou um tamanho maior da população do AG a RN de três neurônios poderia conseguir um desempenho capaz de satisfazer os requisitos. Porém, é também importante o número de testes na planta durante o ajuste, já que quando ele for realizado utilizando o sistema real, ficará inviável se o número de testes for muito elevado.

O aumento do número de indivíduos da população do AG e do número de gerações provoca o aumento do número de testes necessários durante o ajuste. Portanto, é muito importante que esses dois valores não sejam muito grandes. Se com 1.000 gerações, o que equivale a aproximadamente 40.000 testes na planta, o AG não conseguiu um desempenho satisfatório da RN, então o melhor a se fazer é realmente descartá-la, já que durante o ajuste utilizando o sistema real pretende-se utilizar um número de gerações bem menor, reduzindo mais ainda as chances de que essa RN consiga um bom desempenho no controle.

Para o ajuste da RN de quatro neurônios com funções de ativação sigmoide, o AG também realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.12, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 0,85 s, 5,44%, 59,0 l.s/min, 63,35 e 14,56%.

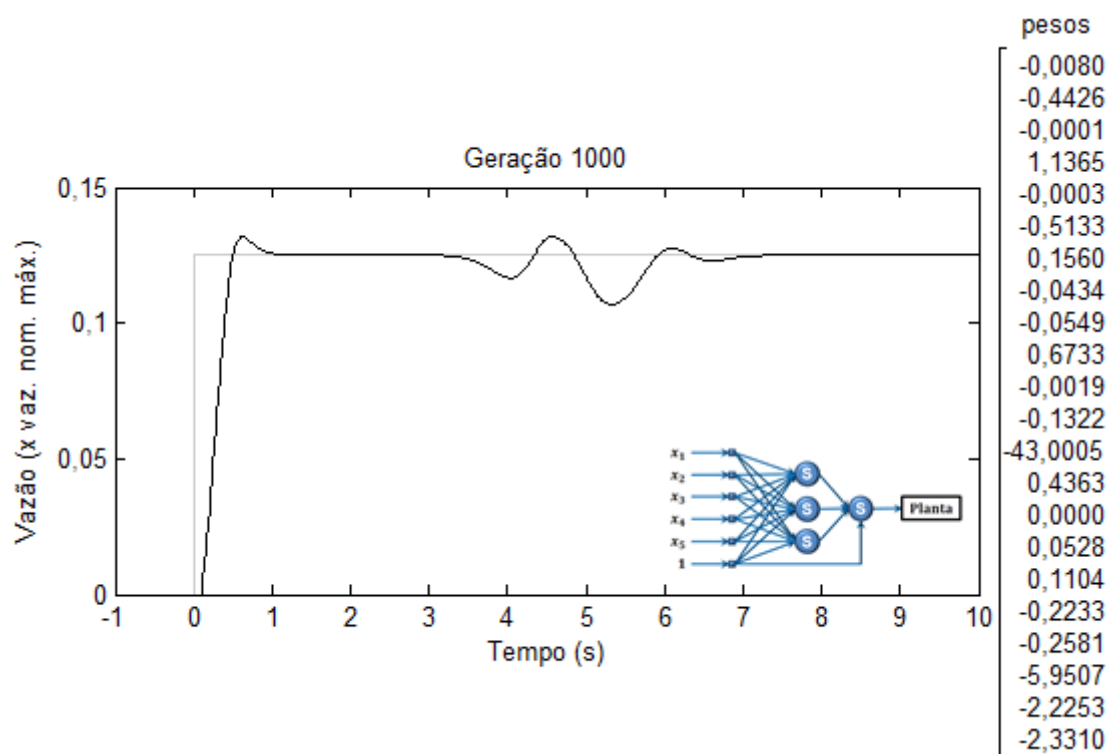


Figura 5.12 – Resultado do ajuste da RN de quatro neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Na Figura 5.12, pode ser observado que a RN de quatro neurônios com funções de ativação sigmoide também conseguiu minimizar o efeito do torque que foi simulado, porém, mesmo com o ajuste sendo feito com 1.000 gerações, ela foi bem menos efetiva que a RN de um neurônio com função de ativação linear. Como a RN de quatro neurônios obteve uma oscilação do sinal de saída maior que 5% durante a simulação do torque, ela também não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

Para o ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação sigmoide o AG também realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.13, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Nesse ajuste não foi obtido *settling time*. Os valores obtidos de integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 281,5 l.s/min, 17,56 e 68,32%.

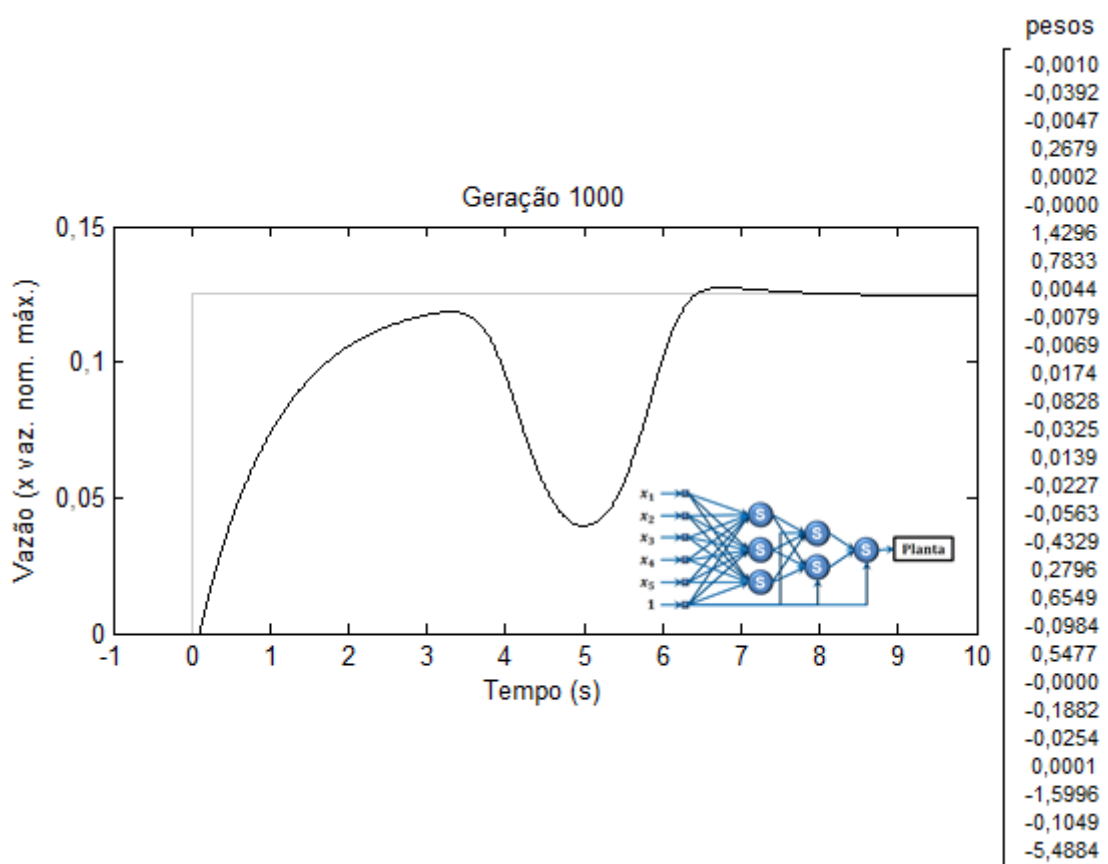


Figura 5.13 – Resultado do ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação sigmoide na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

A Figura 5.13 mostra que a RN de seis neurônios com funções de ativação sigmoide não conseguiu minimizar o efeito do torque que foi simulado, mesmo com o ajuste sendo feito com 1.000 gerações. Como a RN de seis neurônios não conseguiu manter uma oscilação do sinal de saída menor que 5% durante a simulação do torque, ela também não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

Para o ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação quadrática o AG também realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.14, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 1,11 s, 0,24%, 58,0 l.s/min, 64,24 e 19,36%.

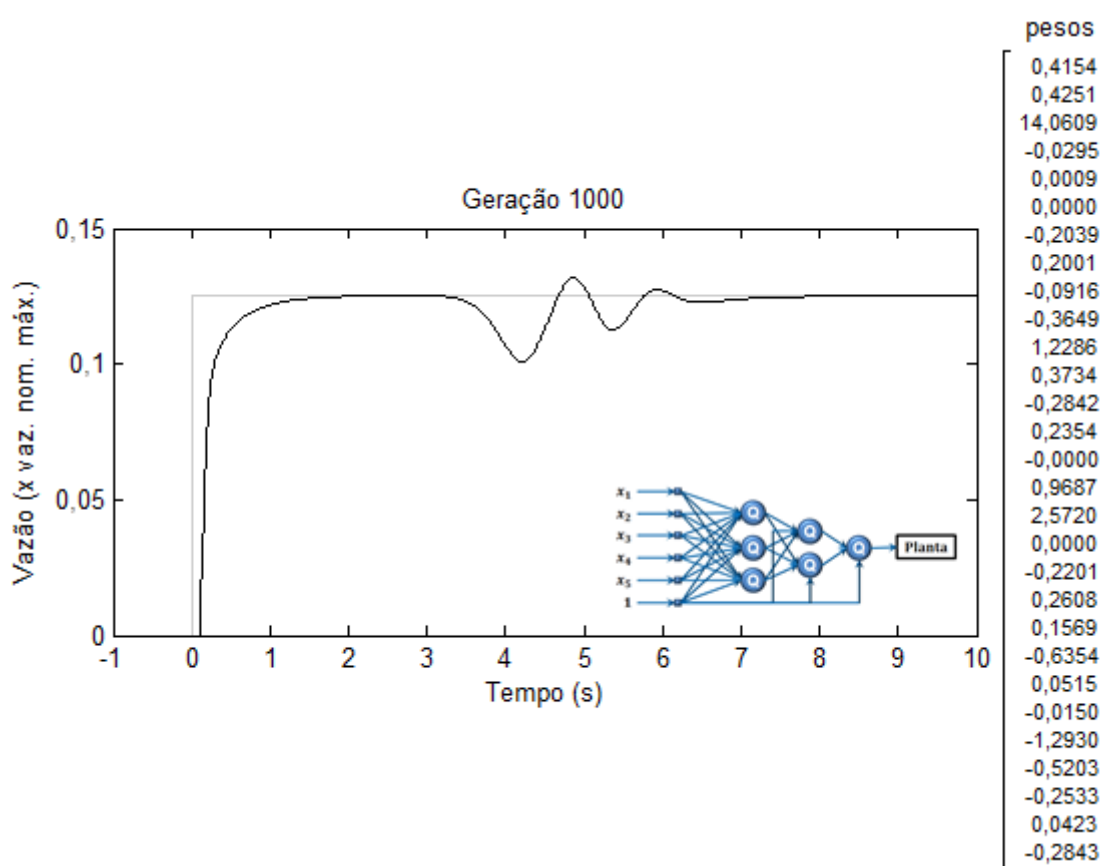


Figura 5.14 – Resultado do ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação quadrática na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Na Figura 5.14, pode ser observado que a RN de seis neurônios com funções de ativação quadrática conseguiu minimizar o efeito do torque que foi simulado, porém, mesmo com um número elevado de gerações, ela foi bem menos efetiva que a RN de um neurônio com função de ativação linear. Como a RN de seis neurônios obteve uma oscilação do sinal de saída maior que 5% durante a simulação do torque, ela também não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

Para o ajuste da RN de seis neurônios com funções de ativação linear, sigmoide e degrau, o AG também realizou 1.000 gerações. O resultado obtido pode ser visto na Figura 5.15, que apresenta também o vetor dos pesos obtidos no final do ajuste. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 0,6 s, 5,12%, 49,7 l.s/min, 64,17 e 6,08%.

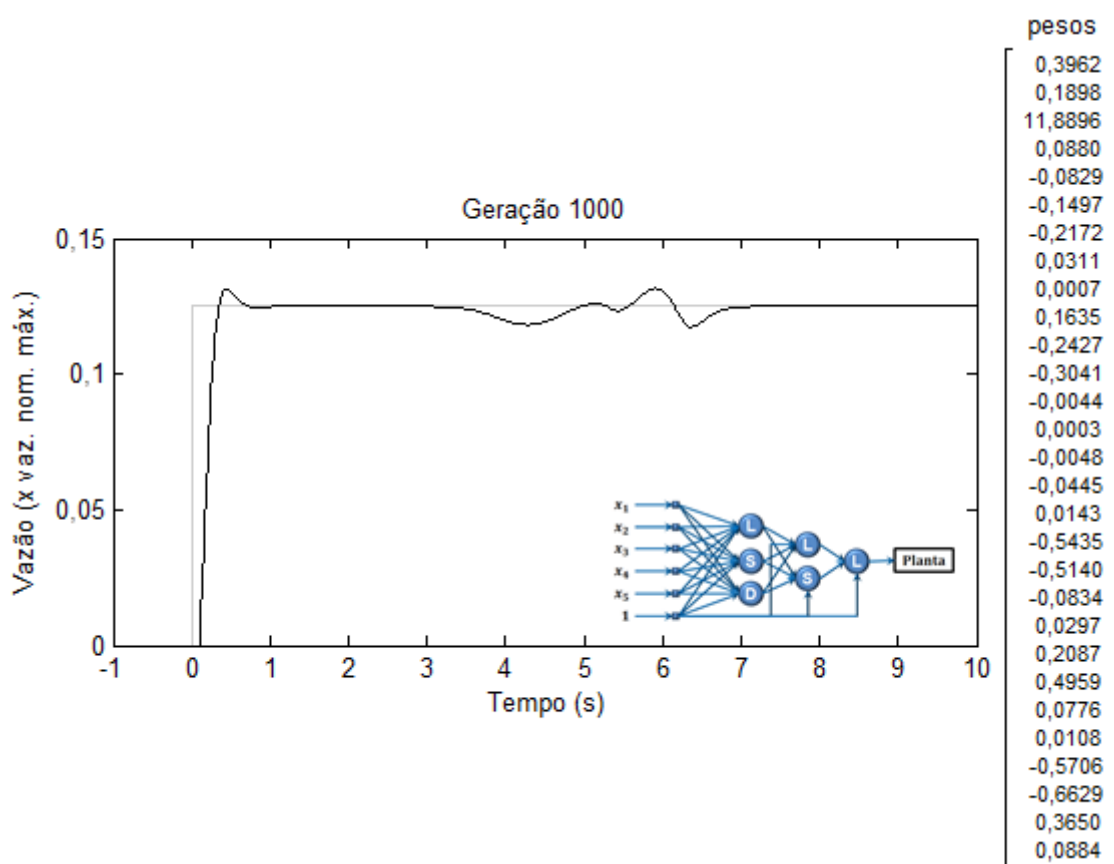





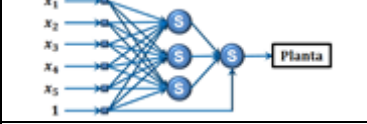
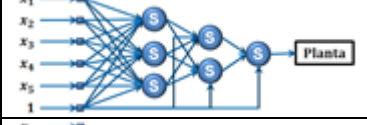


Figura 5.15 – Resultado do ajuste da RN de quatro neurônios com funções de ativação linear, sigmoide e degrau na planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

A Figura 5.15 mostra que a RN de seis neurônios com funções de ativação linear, sigmoide e degrau, conseguiu minimizar o efeito do torque que foi simulado e quase conseguiu obter o mesmo desempenho da RN de um neurônio com função de ativação linear. Porém, mesmo com o dobro do número de gerações para o seu ajuste, a RN de seis neurônios foi menos efetiva que a RN de um neurônio. Como a RN de seis neurônios obteve uma oscilação do sinal de saída um pouco maior que 5% durante a simulação do torque e precisou de um número maior de gerações para ficar perto de conseguir atingir os requisitos de desempenho, ela também não foi considerada apta para ser empregada no controle de rotação da UPPA3.

A Tabela 5.5 mostra os desempenhos obtidos por todas as RNs no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação. Nela pode ser observado que a RN de um neurônio com função de ativação linear foi a única que conseguiu atingir os requisitos de desempenho, ou seja, a única que conseguiu controlar o sistema proposto de

forma que a oscilação do sinal de saída durante a simulação do torque ficasse inferior a 5%. Além disso, como mencionado anteriormente, ela conseguiu esse bom desempenho depois de um ajuste com 500 gerações, sendo que todas as outras RNs foram ajustadas com 1.000 gerações e mesmo assim não obtiveram um desempenho satisfatório no controle.

Tabela 5.5 – Desempenhos obtidos pelas RNs no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Rede Neural	<i>Settling time</i> (s)	<i>Overshoot</i> (%)	ITAE (l.s/min)	Nota fuzzy	Oscilação máx. da saída (%)
	0,42	1,92	30,4	30,14	4,72
	0,42	2,16	45,8	62,11	9,36
	1,06	1,76	86,2	43,71	10,40
	0,85	5,44	59,0	63,35	14,56
	Não obteve		281,5	17,56	68,32
	1,11	0,24	58,0	64,24	19,36
	0,60	5,12	49,7	64,17	6,08

Como a RN de um neurônio com função de ativação linear foi a única que conseguiu atingir os requisitos de desempenho necessários e também obteve os melhores resultados no sistema de controle do Simulink® desenvolvido para o projeto do controlador, ela foi selecionada para realizar o controle de rotação da UPPA3. Além do seu bom desempenho no controle, ela também é uma das que possuem o menor número de parâmetros que devem ser ajustados dentre as RNs testadas. Como mencionado anteriormente, quanto maior esse

número, maior é a dificuldade enfrentada pelo AG no ajuste e, portanto, ela é uma das que consegue ser ajustada mais facilmente.

Em seguida, foi inserido um controlador PID no lugar da RN selecionada, visando fazer um comparativo entre os seus respectivos desempenhos. Como mencionado na seção 4.4.1, o ajuste do controlador PID foi realizado, primeiramente, sem variação da vazão nominal, ou seja, mantendo-a em 100% durante todo o processo de ajuste pelo AG. Depois de ajustado, o controlador PID foi inserido no sistema com distúrbio, ou seja, com variação da vazão nominal. O resultado obtido pelo controlador PID ajustado sem distúrbio comparado com o resultado obtido pela RN selecionada pode ser visto na Figura 5.16. Depois de 500 gerações, o controlador PID ajustado sem distúrbio obteve um *settling time* de 0,31 s, um *overshoot* de 1,44%, uma integral do erro absoluto de 24,3 l.s/min e uma nota de 93,26. As constantes obtidas para K_p , K_i e K_d foram, respectivamente, 6,5261, 5,3604 e 0,1656. Com distúrbio a variação máxima da saída da planta utilizando o controlador PID foi de 42%.

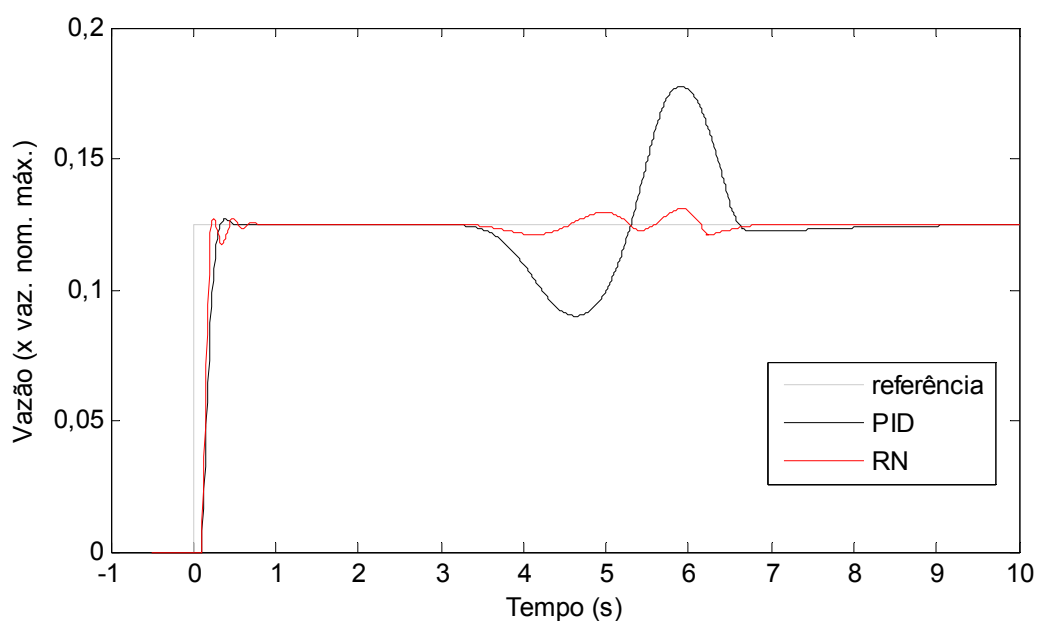


Figura 5.16 – Resultados obtidos pela RN selecionada e pelo controlador PID ajustado sem distúrbio no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Pelo resultado apresentado na Figura 5.16 pode-se perceber que o controlador PID não conseguiu impedir uma variação muito grande da saída da planta durante uma simulação de torque. A RN selecionada para o controle de rotação da UPPA3 se mostrou bem superior ao

controlador PID em termos de desempenho no controle. Isso mostra que um ajuste em vazio, ou seja, sem considerar a variação de torque, como geralmente é realizado no caso do controlador PID, não é suficiente para garantir um bom desempenho no controle de rotação no processo de reparo por atrito, já que nele ocorrem grandes variações de torque e, conseqüentemente há grandes mudanças do comportamento do sistema em um curto espaço de tempo.

Para poder comparar o desempenho do controlador PID e da RN na mesma situação, ou seja, ambos ajustados nas mesmas condições, em seguida o controlador PID foi ajustado utilizando a mesma variação de vazão nominal que foi considerada no ajuste da RN. O resultado obtido pelo controlador PID ajustado com distúrbio, comparado com o resultado obtido através da RN selecionada pode ser visto na Figura 5.17. Depois de 500 gerações, o controlador PID ajustado com distúrbio obteve um *settling time* de 2,64 s, um *overshoot* de 21,6%, uma integral do erro absoluto de 93,1 l.s/min e uma nota de 28,38. As constantes obtidas para K_p , K_i e K_d foram, respectivamente, 11,0338, 4,1745 e 0,4155. A variação máxima da saída da planta utilizando o controlador PID foi de 27,3%.

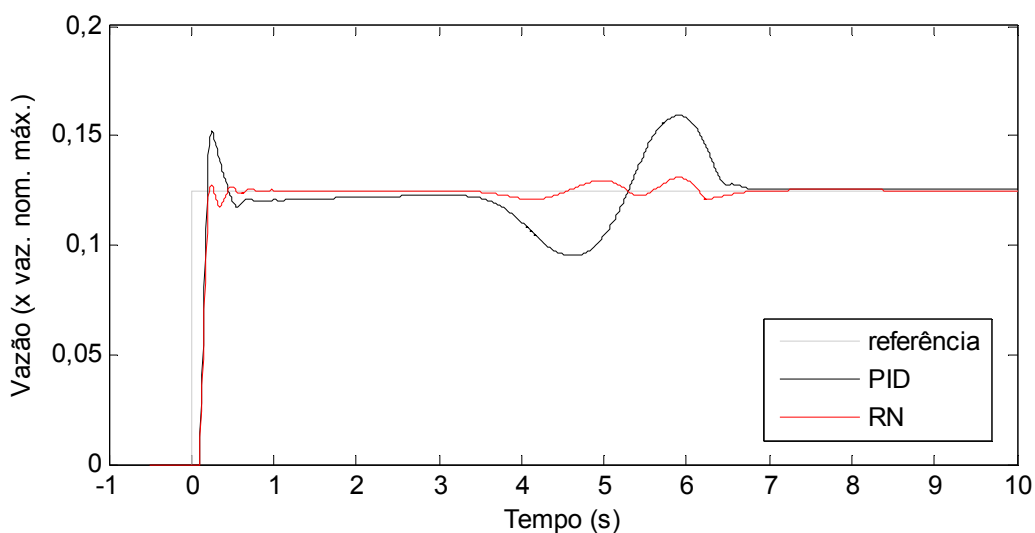


Figura 5.17 – Resultados obtidos pela RN selecionada e pelo controlador PID ajustado com distúrbio no controle da planta do Simulink® desenvolvida para o projeto do controlador de rotação

Pode ser observado na Figura 5.17 que, mesmo sendo ajustado com o distúrbio, o controlador PID não conseguiu impedir uma variação muito grande da saída da planta durante a simulação de torque, apesar de ter conseguido reduzir bastante essa variação quando

comparado com o ajuste em vazio. Esse controlador se mostrou ainda bem inferior, em termos de desempenho no controle, à RN selecionada. Isso mostra que o controlador PID realmente não é adequado para o controle de rotação durante o processo de reparo por atrito. Como o controlador PID não consegue garantir um bom desempenho no controle de rotação no processo de reparo por atrito, isso pode explicar a faixa limitada de realização de ensaios na UPPA3, mostrada na seção 2.2, já que nela o controle de rotação era realizado a partir desse tipo de controlador.

Por fim, a partir dos resultados obtidos nessa etapa, foi definido então que o controle de rotação da UPPA3 passaria a ser controlado por uma RN de um neurônio com função de ativação linear estruturada como descrito na seção 4.4.1.

5.4.2. Identificação da Planta

Como descrito na seção 4.4.2, para obter os dados de entrada e saída da planta do sistema de rotação da UPPA3, a respectiva válvula direcional proporcional foi submetida a diversos níveis de abertura e a vazão da bomba também foi alterada ao longo do processo para simular o efeito do torque. Na Figura 5.18 é mostrado o sinal utilizado para a abertura da válvula em função do tempo, assim como o sinal enviado para variar a vazão da bomba.

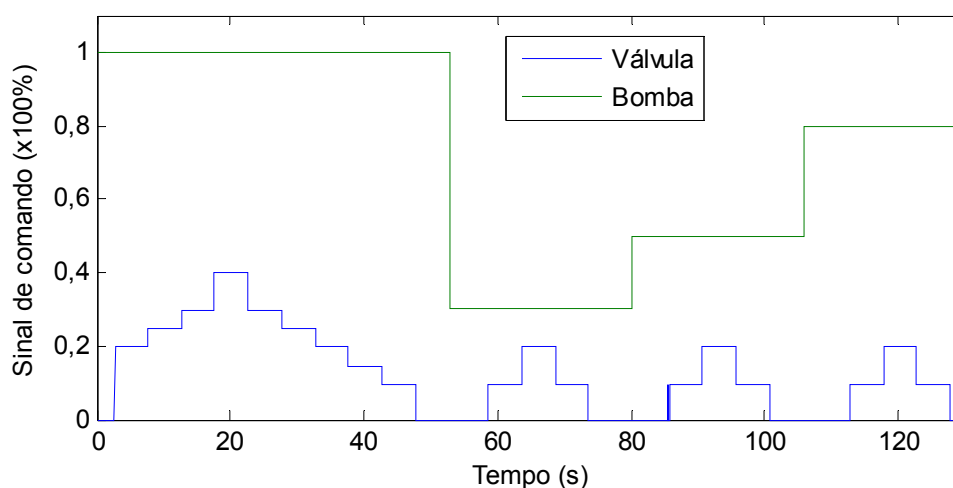


Figura 5.18 – Sinais de entrada da válvula direcional proporcional e da bomba utilizados no experimento de identificação da planta do sistema de rotação

Como descrito anteriormente, considerando a Figura 5.18, a faixa de 0 a 1 corresponde à faixa de abertura da válvula direcional proporcional e de vazão da bomba de 0 a 100%. Na

Figura 5.19 é mostrada a curva obtida de rotação, onde, como descrito anteriormente, a faixa de 0 a 1 corresponde à rotação de 0 a 2.000 rpm. Na Figura 5.20 é mostrada a curva obtida de vazão nominal.

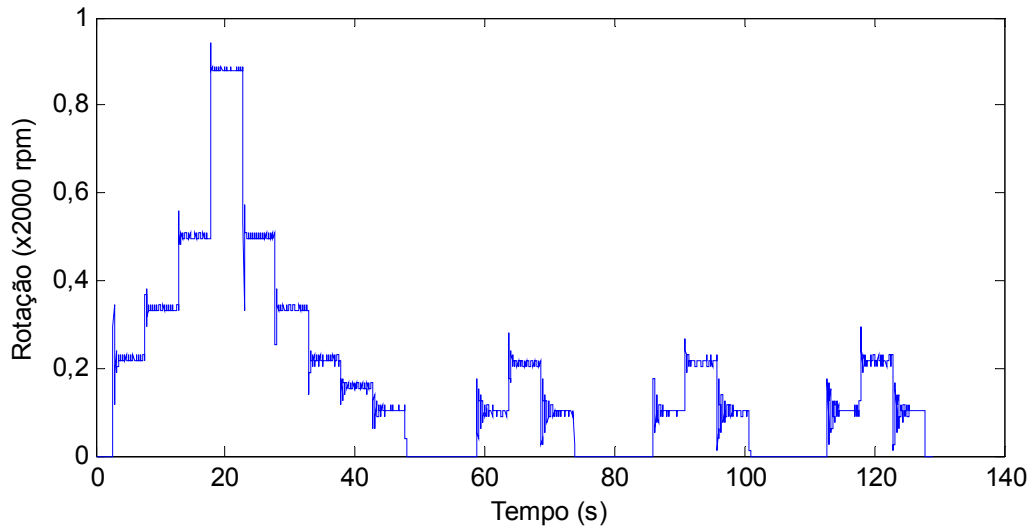


Figura 5.19 – Sinal de rotação obtido no experimento de identificação

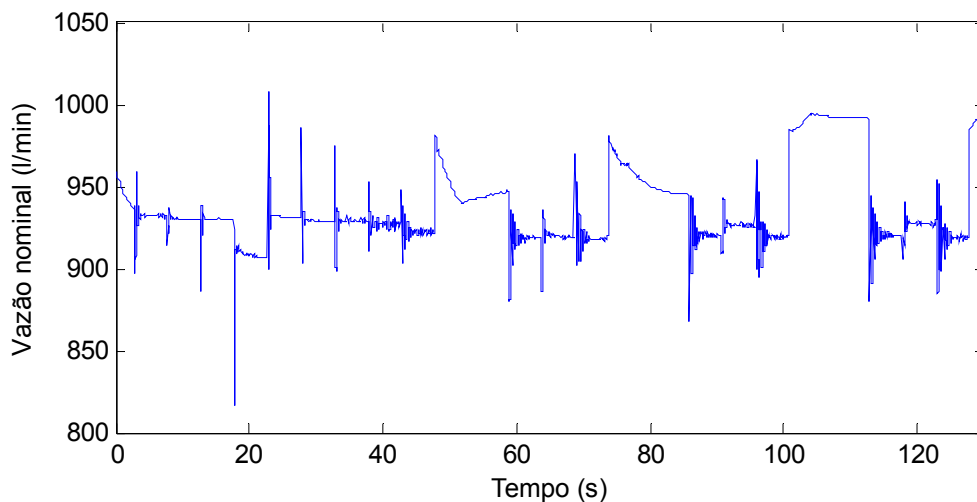


Figura 5.20 – Sinal de vazão nominal obtido no experimento de identificação da planta do sistema de rotação

Pode-se observar na Figura 5.20 que não houve uma variação significativa da vazão nominal no experimento de identificação com a variação da vazão da bomba. Isso aconteceu porque, para que haja uma redução de pressão na linha hidráulica do sistema de rotação, é necessário que haja uma maior redução da vazão da bomba, mas que também não seja uma

redução tão grande a ponto de impedir que haja rotação do motor hidráulico. O ideal seria que houvesse uma válvula redutora de pressão controlável na linha hidráulica, pois assim seria possível variar a pressão da linha dentro dos níveis desejados para simular o torque, porém esse tipo de dispositivo não está presente na unidade hidráulica da UPPA3.

Por não ter sido obtida uma variação significativa da vazão nominal na válvula direcional proporcional com a variação da bomba durante o experimento, os dados selecionados para o processo de identificação correspondem apenas àqueles onde a vazão da bomba era máxima, ou seja, entre os instantes de tempo de 0 e 50 s.

Analisando os dados de rotação obtidos no experimento de identificação, mostrados na Figura 5.19, observou-se que o tempo de subida da curva de rotação a partir do momento em que a válvula é aberta é de 40 ms, sendo que esse é o tempo de resposta do sensor. Assim, com esses dados, não é possível obter uma boa identificação, já que não puderam ser medidos valores de rotação durante o tempo de subida da respectiva curva. O ideal seria que pudessem ser obtidos pelo menos cinco pontos durante esse tempo. Porém, a UPPA3 não dispõe de um sistema de aquisição de maior velocidade, o que impossibilitou a obtenção de dados adequados para o processo de identificação. Além disso, o ajuste do controlador utilizando a planta identificada tem apenas o objetivo de obter uma faixa inicial dos pesos da RN para posterior utilização na criação da população inicial do AG durante o ajuste utilizando o sistema real. Portanto, apesar de os dados do experimento não serem adequados, eles foram utilizados no processo de identificação da planta de rotação da UPPA3.

Para identificação da planta, conforme descrito na seção 4.4.2, primeiramente foi realizada a divisão do sinal da saída do sistema (rotação na faixa de 0 a 1) pelo de vazão nominal em l/min, obtendo-se assim o sinal de saída da planta, que é mostrado na Figura 5.21.

Como descrito na seção 4.4.2, o modelo adotado para a identificação da planta de rotação da UPPA3 é composto por uma função não linear em série com uma função de transferência. O primeiro passo na identificação dessa planta foi a obtenção das constantes da função não linear e posteriormente da função de transferência.

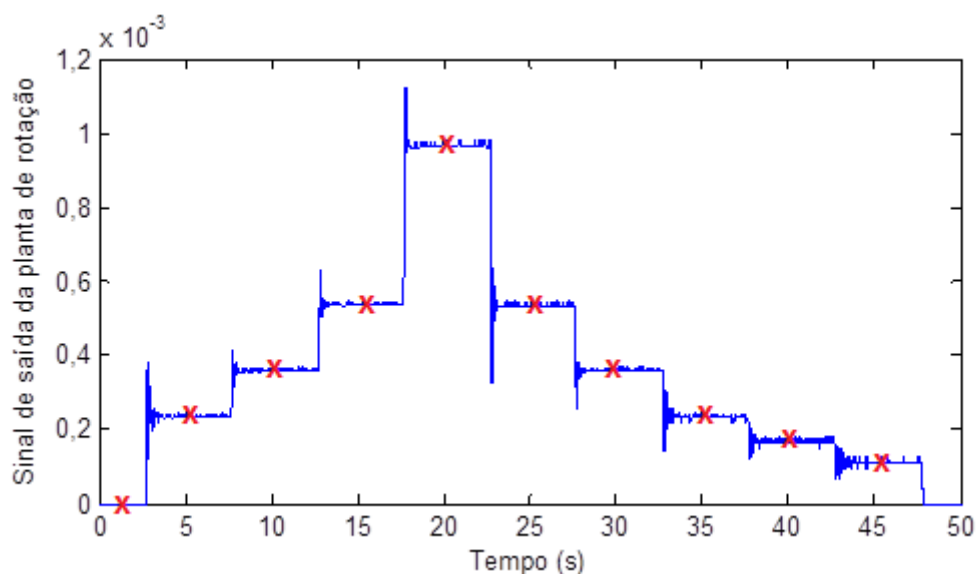


Figura 5.21 – Sinal de saída da planta obtido depois da divisão da rotação (entre 0 e 1) pela vazão nominal (em l/min)

Os pontos marcados no gráfico da Figura 5.21 correspondem aos dados da planta onde a saída, ou seja, a rotação está estabilizada e não apresenta tendência em aumentar ou diminuir, e que foram utilizados para a obtenção das constantes da função não linear. Esses dados foram utilizados na construção da matriz de rotação estável, descrita na seção 4.4.2, a qual é apresentada na matriz 5.2, onde a segunda coluna corresponde à amplitude obtida nos pontos marcados na Figura 5.21 e a primeira corresponde ao respectivo sinal de entrada, que é o sinal enviado para a válvula, obtido a partir do gráfico da Figura 5.18.

$$M_{re} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,0965 & 0,1105 \times 10^{-3} \\ 0,1969 & 0,2319 \times 10^{-3} \\ 0,2471 & 0,3560 \times 10^{-3} \\ 0,2973 & 0,5328 \times 10^{-3} \\ 0,3976 & 0,9669 \times 10^{-3} \\ 0,4980 & 1,5060 \times 10^{-3} \\ 0,6988 & 2,7021 \times 10^{-3} \\ 0,8996 & 3,1032 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

De acordo com o procedimento descrito na seção 4.4.2, foram obtidos os valores das constantes da função não linear da planta de rotação, que foram $0,0033341$, $7,2523 \times 10^{-5}$, $7,5635$ e $3,8061$ para “a”, “b”, “c” e “d”, respectivamente. Assim, a função não linear obtida pode ser vista na equação 5.3, onde “u” é o sinal de entrada da planta. A resposta da função

não linear comparada com a saída real, correspondente à segunda coluna da matriz de rotação estável, pode ser vista na Figura 5.22.

$$f_{nl}(u) = \frac{0,0033341}{1 + e^{-7,5635 \times u + 3,8061}} - 7,2523 \times 10^{-5} \quad (5.3)$$

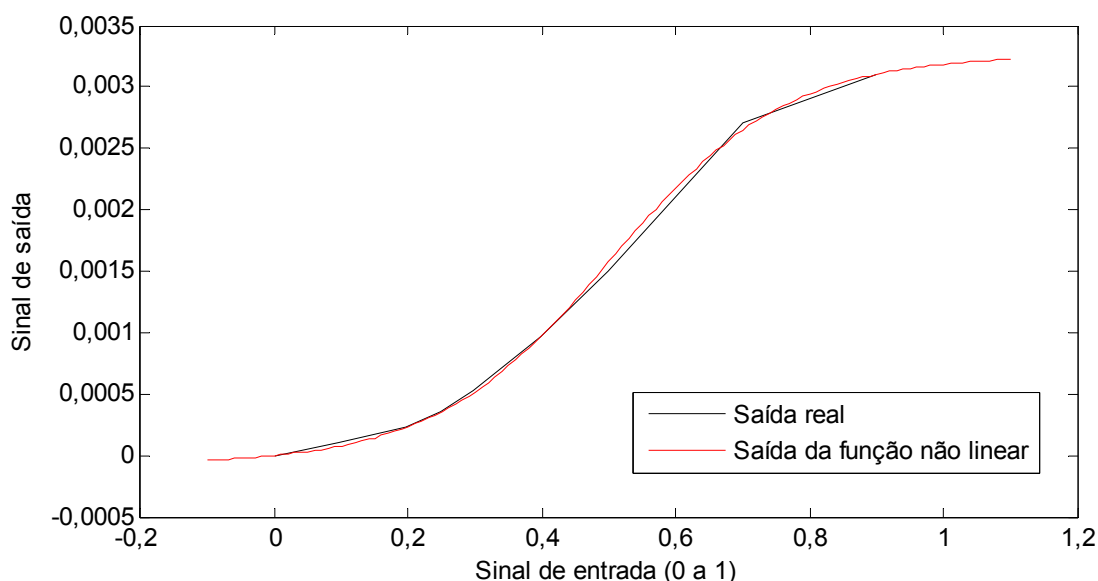


Figura 5.22 – Sinal de saída da função não linear e da planta real nos pontos onde a rotação ficou estável

Pode ser observado na Figura 5.22 que as saídas da planta real e da função não linear ficaram bem próximas e que o comportamento da válvula, correlacionando a sua vazão (que é diretamente proporcional à rotação) com o seu sinal de comando para uma vazão nominal constante, realmente se aproxima de uma curva sigmoide, como mencionado na seção 4.4.2.

Em seguida, os dados de entrada do experimento de identificação (sinal de entrada da válvula da Figura 5.18) foram submetidos à função não linear para que pudessem ser obtidos os dados de entrada da função de transferência da planta. Por fim, depois de testados os modelos de função de transferência mencionados na seção 4.4.2, a partir dos dados obtidos de entrada e saída da planta e do MathWork's System Identification Toolbox (SITB) do Matlab®, a função de transferência que melhor representou o comportamento do sistema real da UPPA3 foi a descrita pela equação 5.4.

$$G_{\text{rotação}}(s) = \frac{1,0375 \times (1 + 0,0077963s)}{(1 + 0,014s + 8,2042 \times 10^{-4}s^2) \times (1 + 0,001s)} \quad (5.4)$$

Depois de definida a função de transferência, foi desenvolvido no Simulink® o modelo teórico responsável por simular o comportamento do sistema de rotação da UPPA3. Conforme descrito na seção 4.4.2 (Figuras 4.24 e 4.25), no modelo do Simulink®, o sinal de entrada passa primeiro pela função não linear e a saída da planta (função não linear em série com a função de transferência) é multiplicada pela vazão nominal para obter-se então o sinal de saída do modelo.

Utilizando os dados obtidos no experimento de identificação, correspondentes ao sinal de entrada da válvula apresentado na Figura 5.18 e à vazão nominal mostrada na Figura 5.20, as respostas obtidas pelo sistema real e pelo modelo desenvolvido no Simulink® para simular o comportamento do sistema de rotação da UPPA3 podem ser comparadas na Figura 5.23.

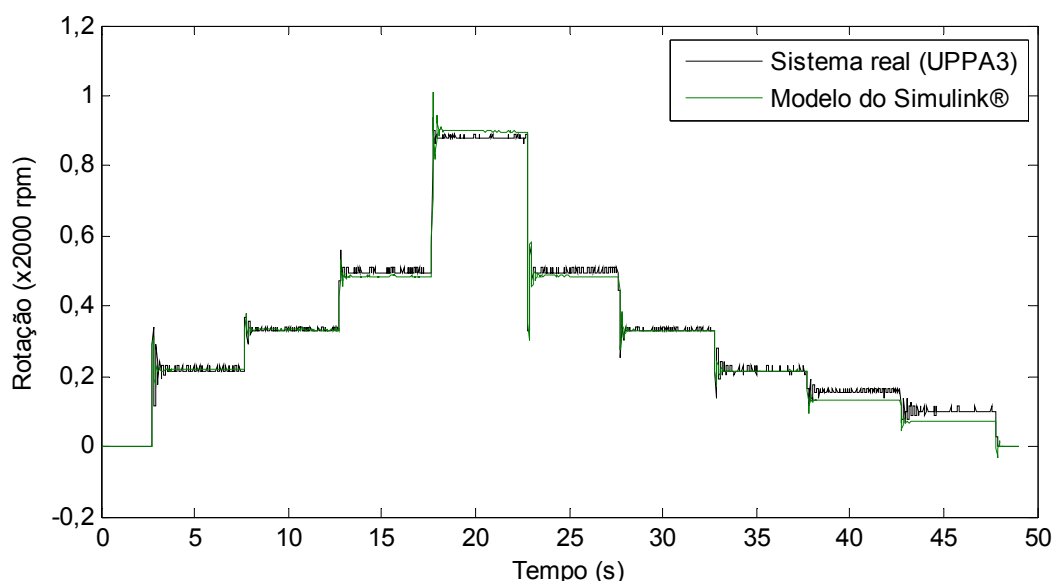


Figura 5.23 – Respostas obtidas pelo sistema real e pelo modelo desenvolvido no Simulink® para simular o comportamento do sistema de rotação da UPPA3

Pode ser observado na Figura 5.23 que o modelo desenvolvido no Simulink® apresentou um comportamento bem próximo do sistema real. Porém deve ser destacado que os dados coletados no experimento de identificação, como mencionado anteriormente, não foram adequados por conta da baixa taxa de aquisição, o que faz com que esse modelo não seja tão confiável quanto poderia ser se os dados tivessem sido coletados com a taxa de

aquisição correta. Assim, esse modelo foi utilizado com certo cuidado, pois se sabe que, por conta das dificuldades relatadas, ele apresenta uma baixa confiabilidade.

5.4.3. Aplicação do AG na Planta Identificada

Depois de realizado o processo de identificação, o AG foi utilizado para ajustar a RN de um neurônio e função de ativação linear no sistema de controle do Simulink®, descrito na seção 4.4.3, que descreve também a variação de vazão nominal adotada durante os testes dos indivíduos do AG para simular o efeito do torque.

Os valores iniciais dos pesos da RN (população inicial do AG) foram todos gerados aleatoriamente na faixa entre -1 e 1. Foram realizadas 1.000 gerações do AG. Na Figura 5.24 são mostrados os pesos obtidos e o resultado final desse ajuste no controle da planta do Simulink®, onde o *setpoint* de 0,5 corresponde a 1.000 rpm. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 2%, considerando apenas a faixa antes do distúrbio), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 0,16 s, 1,98%, 114,2 rpm.s, 95,91 e 1,96%.

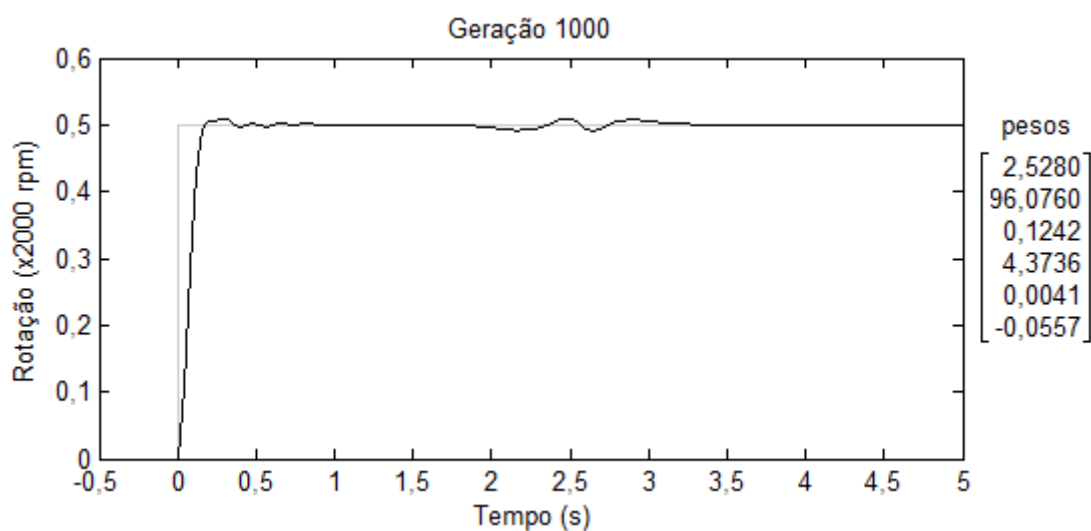


Figura 5.24 – Resultado do ajuste da RN realizado pelo AG no controle de rotação da planta do Simulink®

Pode ser observado na Figura 5.24 que, mesmo simulando uma variação de torque de 462 N.m, a RN conseguiu realizar o controle mantendo a amplitude de oscilação da rotação dentro da faixa de 2% no sistema do Simulink®, o que configura um resultado muito bom para o ajuste.

Em seguida, os pesos obtidos nesse ajuste foram implementados na RN do CLP da UPPA3. O desempenho obtido no controle do sistema real pode ser visto na Figura 5.25.

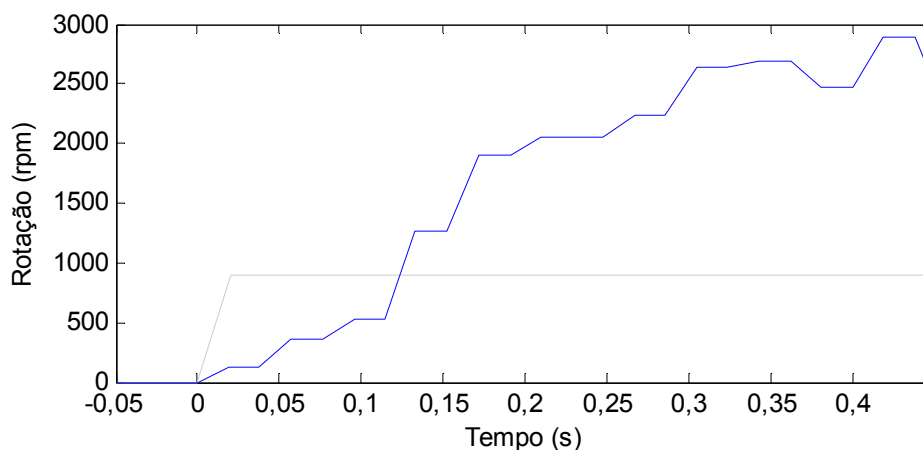


Figura 5.25 – Resultado da RN ajustada pelo AG na planta do Simulink® quando aplicada ao sistema real de controle de rotação da UPPA3

Pode ser observado no gráfico da Figura 5.25 que para o *setpoint* de 900 rpm o sistema se comportou de forma instável e a RN não conseguiu realizar o controle de rotação, fazendo com que o processo fosse interrompido rapidamente para preservar a integridade do sistema hidráulico da UPPA3, já que um comportamento instável nessa unidade pode provocar danos aos componentes mecânicos.

Com o resultado obtido no ajuste utilizando a planta do Simulink® e o comportamento da respectiva RN quando aplicada ao sistema real, pode-se concluir que o modelo teórico não consegue representar o comportamento do sistema real. Isso aconteceu devido à quantidade de variáveis envolvidas neste último como, por exemplo, temperatura do óleo e atrito nos mancais e, principalmente, devido às dificuldades relatadas na seção 5.4.2 durante o processo de identificação, que fez com que esta não fosse bem sucedida.

5.4.4. Aplicação do AG na Planta Real

Devido à instabilidade obtida no controle de rotação da UPPA3, os pesos relativos às partes integral, proporcional e derivativa do erro da RN obtidos no ajuste do sistema do Simulink® não foram utilizados na criação da população inicial do AG que realizou o ajuste utilizando o sistema real. Para fornecer um intervalo viável desses pesos para a criação da população inicial, foi utilizado o método da tentativa no ajuste do controle de rotação da UPPA3, como descrito na seção 4.4.3.

No ajuste pelo método da tentativa a vazão nominal não sofreu variação para simular o efeito do torque, já que esse método é mais simples e o objetivo é obter apenas uma aproximação para os pesos referentes às partes proporcional, integral e derivativa do erro de rotação, não contemplando o ajuste dos pesos das partes relativas à vazão nominal. Conforme mencionado na seção 4.4.3, os pesos relativos a essas partes e ao *bias* que foram utilizados na criação da população inicial do AG para o ajuste no sistema real foram os obtidos no ajuste utilizando a planta do Simulink®.

Depois de executado o procedimento de ajuste pelo método da tentativa, foi obtido o vetor de pesos para a criação da população inicial do AG, mostrado na equação 5.5. Assim, os pesos da população inicial do AG foram gerados aleatoriamente entre zero e os respectivos pesos do vetor da equação 5.5.

$$\text{pesos}_{pop_inicial} = \begin{bmatrix} 2,528 \\ 96,076 \\ 0,03 \\ 50 \\ 4,5 \times 10^{-5} \\ -0,0557 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Depois de definida a faixa de geração da população inicial do AG, o mesmo realizou o ajuste da RN do sistema de controle de rotação da UPPA3 seguindo o procedimento descrito na seção 4.4.3. Como mencionado nessa mesma seção, a vazão da bomba foi alterada ao longo do tempo de teste de cada indivíduo, buscando, assim, obter uma variação na diferença de pressão por aresta da válvula, conseqüentemente mudando sua vazão nominal a fim de simular o efeito do torque. No gráfico da Figura 5.26 são mostradas as curvas de pressão na entrada e na saída da válvula ao longo do tempo de teste de cada indivíduo obtida com a variação de vazão da bomba.

A diferença de pressão por aresta é obtida a partir da subtração da pressão de entrada pela pressão de saída da válvula, considerando a Figura 5.26. Assim, conforme mostrado na seção 4.4.1, com esse valor pode ser obtida a curva de torque que foi simulada ao longo do teste de cada indivíduo, que é apresentada na Figura 5.27.

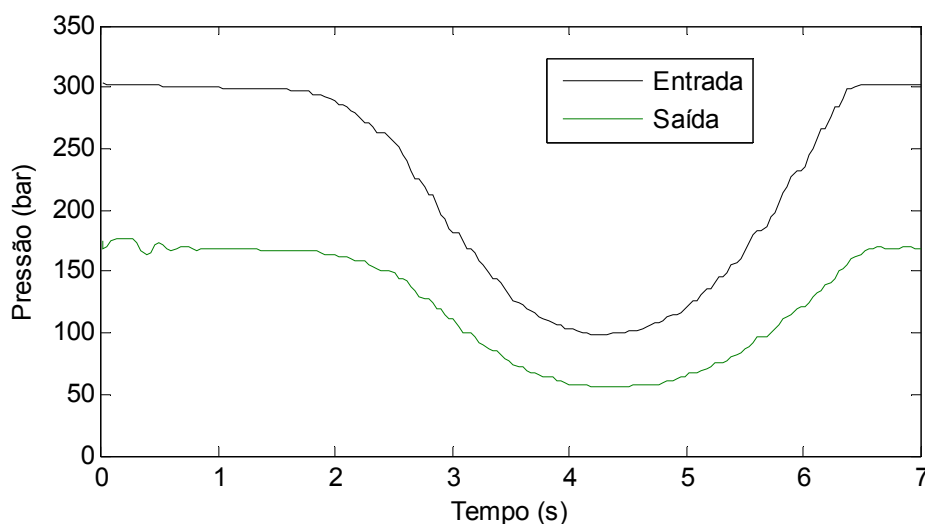


Figura 5.26 – Pressão na entrada e na saída da válvula ao longo do tempo de teste de cada indivíduo durante o ajuste da RN feito pelo AG utilizando o sistema real

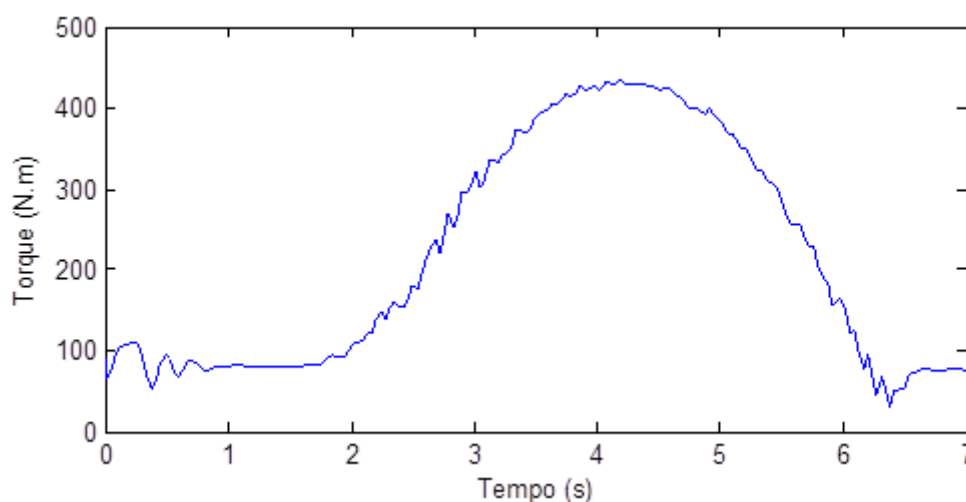


Figura 5.27 – Torque simulado no teste de cada indivíduo durante o ajuste da RN feito pelo AG utilizando o sistema real

A partir do gráfico da Figura 5.27 obtém-se o torque máximo que foi simulado, equivalente a 435 N.m. O ideal seria simular uma variação de torque mais rápida, para obter uma condição mais próxima da que acontece durante o processo de reparo por atrito. Porém, como mencionado anteriormente, a resposta da bomba é lenta e essa foi a máxima velocidade de variação que pôde ser atingida na UPPA3.

Para garantir a segurança do equipamento e do operador durante os testes dos indivíduos, realizados pelo AG durante o ajuste do sistema de controle de rotação da UPPA3,

foi incluída uma rotina no programa de teste do Labview® para interromper o teste quando a rotação atingir um valor 30% maior que o *setpoint*. Quando a rotação atinge esse valor, pode ocorrer instabilidade no sistema de controle, o que traz riscos ao equipamento e ao operador. Assim, quando isso acontece, o teste é interrompido e o respectivo indivíduo recebe a pior nota da população, ou seja, zero. Em seguida, inicia-se o teste do próximo indivíduo. Dessa forma, a segurança está garantida durante o ajuste dos pesos da RN através do AG, utilizando diretamente a planta real.

Além disso, também visando manter a integridade do equipamento, ao fim do teste de cada indivíduo, a válvula direcional proporcional é fechada com uma rampa de um segundo, visando reduzir os golpes de aríete na linha do sistema hidráulico.

Para o ajuste da RN através do AG, utilizando o sistema de controle real, o número de gerações executado foi de 15. Esse número foi reduzido porque durante o ajuste há um aquecimento muito rápido do óleo, pois o sistema de arrefecimento da unidade hidráulica da UPPA3 foi subdimensionado, impossibilitando a realização de muitos testes consecutivos. Mesmo durante essas 15 gerações, foram feitas várias paradas pelo fato de a temperatura do óleo ter ficado muito alta, trazendo riscos ao equipamento. A partir do momento em que a temperatura do óleo atinge seu limite máximo, que é de 70 °C, o programa do CLP não permite a execução de nenhum comando na UPPA3, evitando-se, assim, que os componentes do sistema hidráulico sejam danificados.

Na Figura 5.28 são mostrados os pesos e o resultado obtido para o controle de rotação da UPPA3 a partir da RN ao fim do ajuste realizado pelo AG utilizando a planta real, onde o *setpoint* utilizado foi de 800 rpm. Os valores obtidos de *settling time* (critério de 5%), *overshoot*, integral do erro absoluto, nota *fuzzy* e amplitude de oscilação máxima durante o distúrbio foram, respectivamente, 0,4 s, 4,88%, 243,6 rpm.s, 72,1 e 4,88%.

Na resposta apresentada na Figura 5.28, quando o sistema de controle é acionado, pode ser observado que houve um instante em que a rotação sofre uma forte redução logo depois de atingir o primeiro pico, que foi de aproximadamente 600 rpm. Esse fenômeno ocorre porque, no instante imediatamente anterior à válvula começar a ser aberta, a pressão na sua entrada é máxima e na sua saída é mínima, mas, no instante em que ela se abre, as pressões de entrada e saída têm a tendência de se equalizar rapidamente. Porém, isso não chega a acontecer, pois, nesse momento, o motor hidráulico começa a girar, e, conseqüentemente, a pressão da saída da válvula tende a diminuir novamente. Como essa pressão corresponde à pressão na entrada do motor hidráulico, quando ela diminui, a rotação do motor hidráulico também tende a

diminuir. Esse ciclo, onde ocorrem aumentos e reduções consecutivas da pressão de saída da válvula, acontece até que chega um momento em que essa pressão se estabiliza e, assim, as oscilações na rotação resultantes desse efeito vão reduzindo rapidamente até desaparecerem.

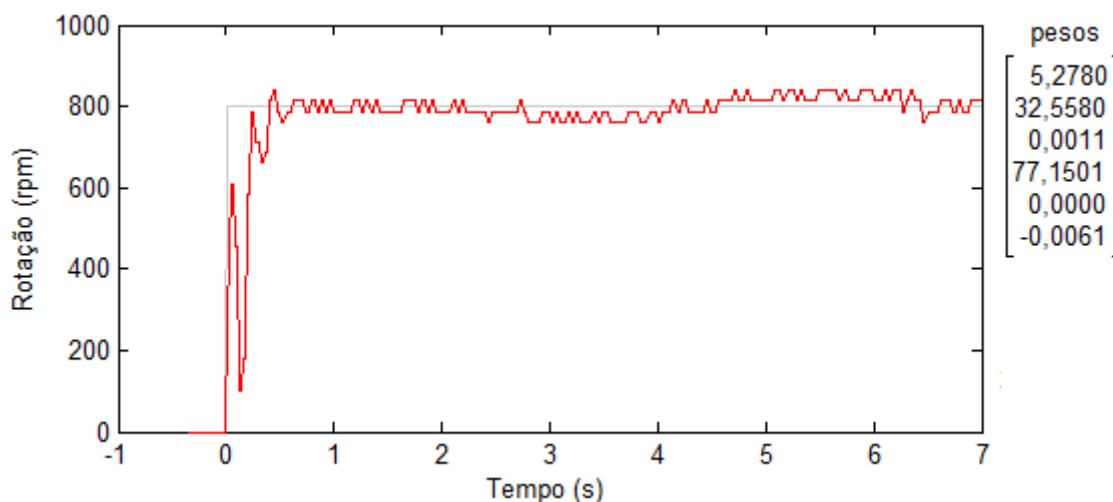


Figura 5.28 – Resultado do ajuste da RN realizado pelo AG no sistema real de controle de rotação da UPPA3

Na Figura 5.19, onde é mostrado o sinal de saída da planta obtido no experimento de identificação para entradas do tipo degrau (conforme Figura 5.18), pode ser observado também esse efeito de oscilação na rotação, o que mostra que ele não é resultante da ação de controle, mas sim do próprio comportamento do sistema. Devido a esse comportamento, o sistema de rotação da UPPA3 é caracterizado como subamortecido. No gráfico da Figura 5.26 podem ser observadas pequenas oscilações na pressão de saída no momento em que a válvula é aberta e o efeito disso no torque simulado pode ser visto na Figura 5.27. Acredita-se que essas oscilações apresentem amplitudes maiores devido ao resultado obtido na rotação (Figura 5.28), porém elas não são registradas por causa do tempo de resposta do sensor de pressão que, de acordo com o respectivo manual, é de 0,3 s.

Pode ser observado na Figura 5.28 que, apesar da grande variação de torque que foi simulada (Figura 5.27), a RN conseguiu manter a rotação dentro da faixa de 5% de erro em relação ao *setpoint*. Esse ajuste obteve sucesso porque todas as não linearidades e variáveis que influenciam o processo, muitas das quais não foram consideradas no modelo matemático, são consideradas durante o ajuste pelo AG utilizando o sistema real, o que faz com que este obtenha um melhor desempenho e promova um controle mais robusto para o sistema.

Como mencionado anteriormente, a simulação de torque que foi utilizada durante o ajuste apresenta uma variação bem mais lenta do que a que ocorre no processo de reparo por atrito, já que quando há o contato entre pino e bloco, o torque atinge seu valor máximo em menos de um segundo. Porém, mesmo utilizando uma variação mais lenta do torque, certamente esse sistema de controle é bem mais robusto do que um que tenha sido ajustado sem considerar a variação desse parâmetro importante para o comportamento do sistema.

Por fim, os pesos do indivíduo que obteve o melhor desempenho no controle de rotação da UPPA3, mostrados na Figura 5.28, obtidos no ajuste do AG através do sistema real, foram implementados definitivamente na RN presente no CLP.

5.5. Ensaios de Reparo por Atrito

Depois de realizado o ajuste dos controladores e implementados os sistemas antitravamento (descrito na seção 4.5) e de fechamento da válvula de controle de rotação com rampa de um segundo, foram realizados os ensaios de reparo por atrito para validar o novo sistema e definir a sua nova faixa operacional.

Como mencionado na seção 4.6, para a realização desses ensaios, foi necessária a construção de um novo programa supervisor para realizar a interface entre o operador e a UPPA3. Na Figura 5.29 é apresentada a interface desse programa, que foi desenvolvido no Labview®. Os valores dos parâmetros de processo podem ser visualizados durante o ensaio a partir dos gráficos e o reparo por atrito pode ser acompanhado em tempo real a partir de uma câmera, cuja imagem é mostrada na parte superior direita da janela do programa.

A janela de inserção de parâmetros de ensaio é mostrada na Figura 5.30. Nela pode ser selecionado se o ensaio é de um ou dois estágios e podem ser inseridos os respectivos valores de força, rotação, comprimento de queima, força de forjamento, tempo de forjamento, comprimento máximo de queima e nome da pasta de salvamento dos dados do ensaio. No local indicado para a pasta de salvamento dos dados, são armazenados os respectivos valores de força, rotação, comprimento de queima e torque obtidos ao longo do ensaio e a filmagem feita pela câmera. Caso a pasta de salvamento não seja informada, ela é criada automaticamente e ao fim do ensaio é informado ao usuário o seu caminho.

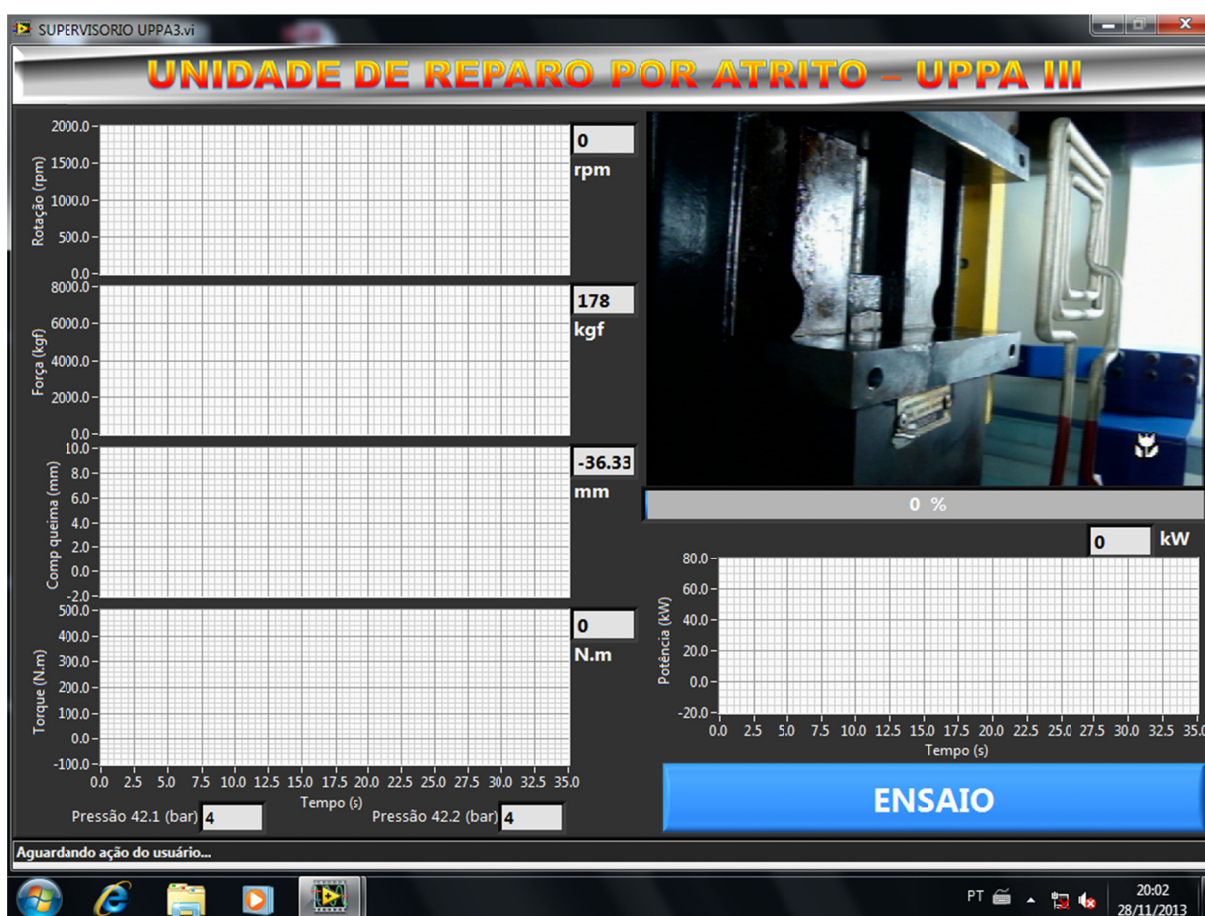


Figura 5.29 – Interface do programa supervisor desenvolvido para a realização de reparos por atrito na UPPA3

O comprimento máximo de queima é um parâmetro de segurança e interrompe o ensaio a qualquer momento em que seja atingido. Isso foi feito porque, dependendo da força utilizada no ensaio, durante a etapa de forjamento pode haver um avanço muito grande do pino, o qual está fixado por uma placa de castanhas. Com isso, há o risco de a face do bloco tocar a placa de castanhas e danificá-la. Como a etapa de forjamento, diferentemente das outras etapas, é controlada pelo tempo e não pelo comprimento de queima, isso garante que não haverá um avanço exagerado do pino ao fim do reparo.

Depois de construído o programa supervisor, foram realizados, então os ensaios para avaliação do desempenho do novo sistema de controle implementado na UPPA3. Como mencionado na seção 4.6, inicialmente foram realizados ensaios nas condições em que o sistema de controle anterior também era capaz de realizar, com o intuito de avaliar o que mudou em relação ao desempenho no controle dos parâmetros força e rotação.

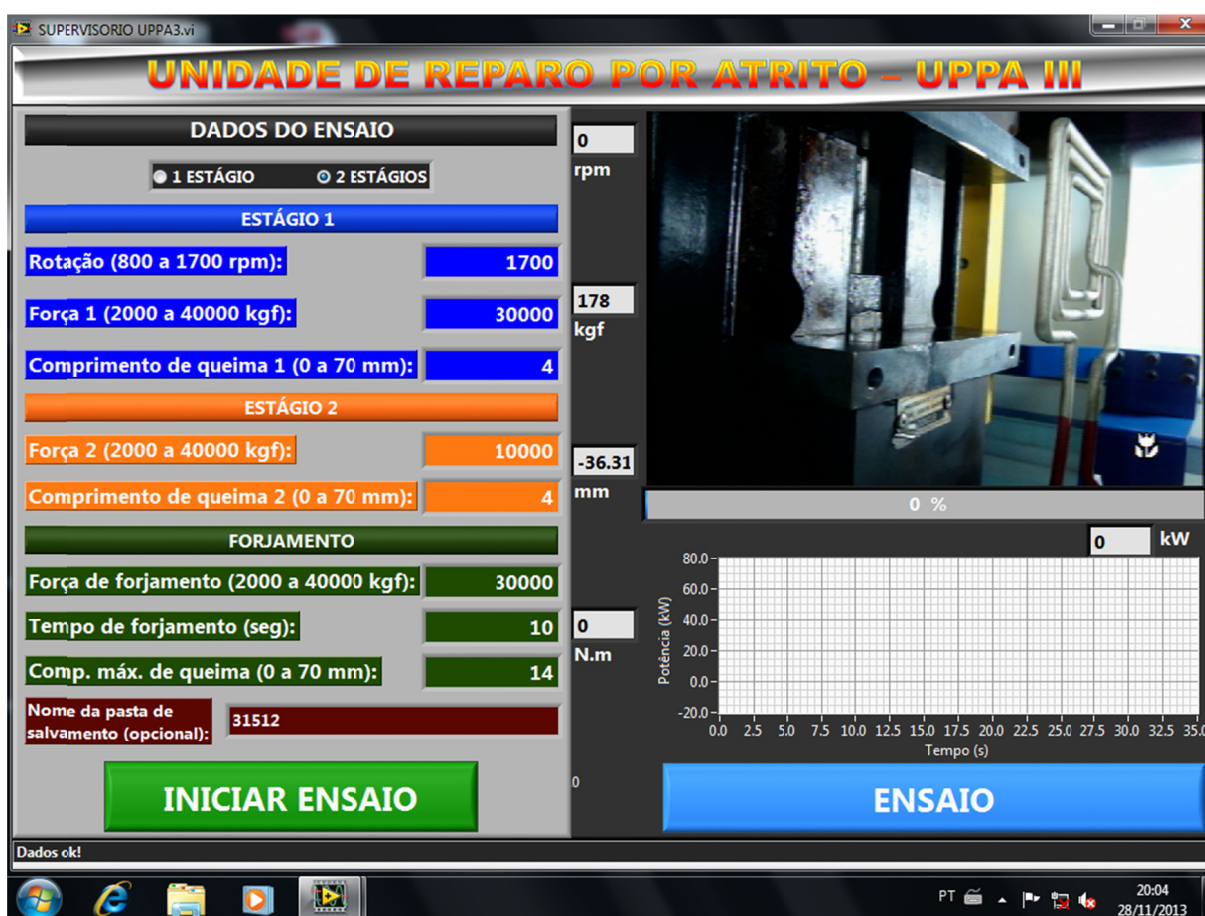


Figura 5.30 – Janela de inserção dos dados para a realização do ensaio de reparo por atrito na interface do programa supervisor da UPPA3

Como mostrado na descrição do programa inserido no CLP (seção 5.1.2), durante a realização dos ensaios, o sistema de controle de rotação é acionado antes de haver o contato entre pino e bloco, ou seja, com ambos afastados um do outro, e só depois que a rotação de ensaio é atingida é que se inicia a aproximação dos mesmos. Assim, o primeiro comparativo realizado entre o desempenho antes e depois da implementação do novo sistema foi em relação ao controle de rotação.

A comparação entre o desempenho antes e depois da implementação do novo sistema de controle de rotação, para um *setpoint* de 1.400 rpm, pode ser vista na Figura 5.31. Pode ser observado que o sistema anterior se mostra bem inferior ao atual em termos de desempenho no controle, já que ele obteve um *settling time* (critério de 5%) de 7,6 s, contra 0,48 s do sistema atual, e um *overshoot* de 31,4%, contra 4,86% do sistema atual.

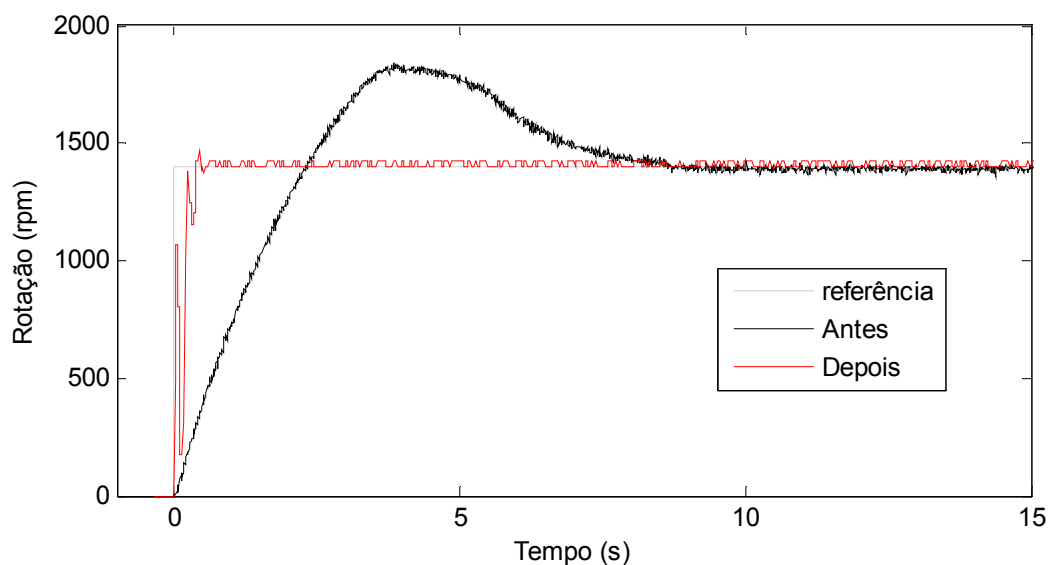


Figura 5.31 – Desempenho do controle de rotação antes e depois da implementação do novo sistema

No resultado apresentado na Figura 5.31, o sinal de rotação do sistema anterior foi medido pelo CLP na saída do conversor de frequência em tensão, já que o cartão PID usava esse sinal como *feedback*. Uma desvantagem de utilizar o conversor de frequência em tensão é que ele possui uma baixa resposta em frequência para poder conseguir retificar o sinal pulsado vindo do sensor e diminuir o efeito de *ripple*, o que faz com que ele não seja capaz de detectar rápidas variações de rotação, que é o que ocorre quando acontece o travamento. Assim, o controlador PID que era utilizado não conseguia detectar rápidas variações de rotação e efetuar a correção antes que o travamento acontecesse.

Em todos os ensaios realizados, o valor adotado para o comprimento de queima máximo foi de 24 mm, já que, para todos os pinos e blocos utilizados, esse é o limite para que não haja contato da castanha com bloco. O resultado do primeiro ensaio realizado pode ser visto na Figura 5.32, onde foram adotados os seguintes parâmetros: geometria “A”, um estágio, rotação de 1.700 rpm, força do primeiro estágio de 60 kN, comprimento de queima de 7 mm, força de forjamento de 60 kN e tempo de forjamento de 10 s.

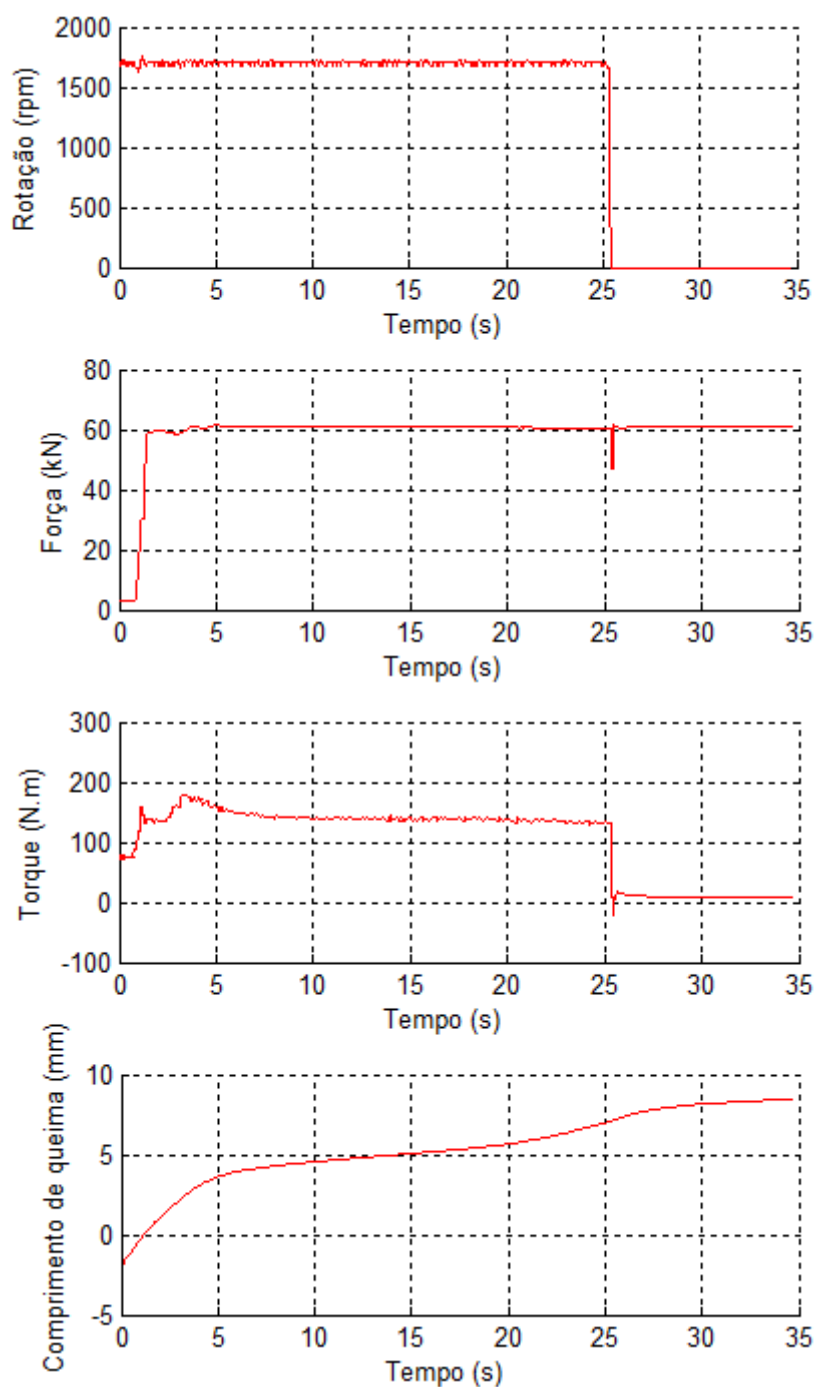


Figura 5.32 – Resultado do primeiro ensaio de reparo por atrito realizado com o novo sistema de controle da UPPA3

Nos gráficos da Figura 5.32, o contato entre pino e bloco ocorre no momento em que o comprimento de queima atinge o valor zero, o que corresponde ao instante de 1,2 s nesse caso. Pode ser observado que nesse instante há uma pequena oscilação na rotação devido ao aumento do torque, mas que não chega à amplitude de 100 rpm em relação ao *setpoint*. Por

isso, o sistema antitravamento não foi acionado. Depois dessa oscilação, que não chegou a atingir nem 5%, a rotação manteve-se dentro da faixa de 3% de erro ao longo de todo o primeiro estágio do processo de reparo por atrito.

Quando ocorre o contato entre pino e bloco, o sistema de controle de força é ativado. Pode ser observado na Figura 5.32, que a força atingiu seu valor de *setpoint* rapidamente, em 0,14 s. Depois disso, a força se manteve dentro da faixa de erro de 2,5% ao longo de todo o primeiro estágio. Ao fim do primeiro estágio, no instante de tempo de 25,4 s, percebe-se que há uma grande oscilação na força. Isso acontece porque o sistema hidráulico de força está interligado com o de rotação, assim, quando a rotação cessa no fim do primeiro estágio, ela provoca um distúrbio na pressão de alimentação do sistema de força.

Como mostrado na seção 5.1.2, no início do forjamento, o motor diesel que aciona a bomba do sistema de rotação é desativado para evitar que ele fique ligado sem necessidade. Quando isso acontece, a pressão interna da bomba diminui até atingir o valor zero. Nesse momento, pela forma como foi estruturada a unidade hidráulica, uma pequena parte do óleo que está pressurizado na linha do sistema de força passa a fluir pela bomba do sistema de rotação. É exatamente nesse instante que há a oscilação na pressão de alimentação do sistema de força, consequentemente provocando um momento de instabilidade da mesma.

Apesar dessa desvantagem, essa oscilação é rápida, de aproximadamente 0,2 s. O sistema volta a se estabilizar rapidamente e o erro de força fica dentro da faixa de 2,5% até o fim do processo de reparo por atrito.

Caso o motor diesel ficasse ligado e o sistema de rotação ficasse pressurizado até o fim do ensaio para evitar o problema da oscilação de força, haveria outra desvantagem ainda pior. Nesse caso, como a válvula de controle de rotação possui vazamentos, a pressão de um lado do motor hidráulico (entrada ou saída) iria aumentar, fazendo com que esse ficasse aplicando torque durante a etapa de forjamento. Não se sabe qual seria o efeito na qualidade do reparo caso esse torque ficasse sendo aplicado e, portanto, optou-se por evita-lo. Os vazamentos da válvula do sistema de rotação são tão evidentes que, por mais que se tente ajustar o ponto zero da mesma, ao pressurizar o sistema, o motor hidráulico fica girando bem lentamente. Por conta disso, visando a segurança, é sempre recomendável que durante o procedimento de montagem do pino e do bloco o sistema de rotação não esteja pressurizado. Como a oscilação da força é muito rápida, optou-se então por mantê-la e evitar a aplicação de torque durante a etapa de forjamento.

Com relação ao torque obtido no primeiro ensaio de reparo por atrito (Figura 5.32), podem ser observados dois picos principais, um no instante de tempo de 1,2 s e outro no de 3,46 s. Além disso, o torque em vazio do sistema de rotação da UPPA3, ou seja, antes de ocorrer o contato entre pino e bloco, foi de aproximadamente 70 N.m. Como mencionado na seção 3.2, a incerteza de medição do torque é de 50 N.m. O primeiro pico de torque ocorre exatamente no momento em que há o contato entre pino e bloco, e seu valor chega a 159 N.m. Nesse momento, o material já começa a se aquecer devido ao atrito, fazendo com que sua resistência mecânica diminua e, assim, o torque apresente uma pequena e rápida redução no seu valor. Na sequência, as imperfeições das superfícies do pino e do furo vão sendo removidas, fazendo com que a área de contato aumente e, conseqüentemente, o torque vai aumentando. Assim, o segundo e maior pico de torque ocorre 2,26 s depois e atinge o valor de 181 N.m. Em seguida, devido ao aquecimento pelo atrito e conseqüente redução de resistência mecânica do material, o torque vai diminuindo e no fim do primeiro estágio, seu valor é de 133 N.m.

Com relação ao comprimento de queima (Figura 5.32), inicialmente seu valor aumenta rapidamente, já que a área de contato entre pino e bloco é menor, fazendo com que o pino ofereça menor resistência mecânica. Em seguida, a área de contato entre pino e bloco vai aumentando e a taxa de aumento do comprimento de queima vai reduzindo. Porém, próximo do fim do primeiro estágio, essa taxa começa a aumentar novamente. Isso acontece porque o calor gerado pelo atrito faz com que o material aumente sua temperatura e, conseqüentemente, sua resistência diminui. Assim, mesmo com uma área de contato maior, a taxa de aumento do comprimento de queima começa a crescer novamente. Quando a rotação cessa, essa taxa reduz novamente, pois nesse momento não está mais sendo gerado calor pelo atrito, fazendo com que o material esfrie e aumente a sua resistência. Esse fenômeno também pôde ser observado nos trabalhos de Meyer (2003), Pires (2007), Borges (2011) e Gontijo (2012).

Pode ser observado ainda, na Figura 5.32, que apesar da válvula estar sendo fechada com uma rampa de um segundo, a rotação chega a zero bem antes de esse tempo ser completado. Isso acontece porque o processo deixa de gerar calor à medida que a rotação diminui e, conseqüentemente, a temperatura do material também diminui, provocando um aumento rápido da sua resistência mecânica e fazendo com que o torque gerado pelo próprio processo realize a parada do motor hidráulico. Apesar disso, como o motor diesel é desligado e o sistema de rotação é despressurizado no momento em que a etapa de forjamento é iniciada, não há fortes impactos no motor hidráulico durante a sua parada. Isso pode ser

constatado pela curva de torque, que não apresenta nenhum pico quando a rotação é levada a zero.

Para comparar os desempenhos do controle de força e rotação da UPPA3 antes e depois da implementação do novo sistema, foram utilizados os dados obtidos no gráfico da Figura 5.32 e os dados de um ensaio realizado com os mesmos parâmetros desse, mas utilizando o sistema anterior. Assim, foram construídos os gráficos da Figura 5.33, onde são apresentados os resultados desses dois ensaios.

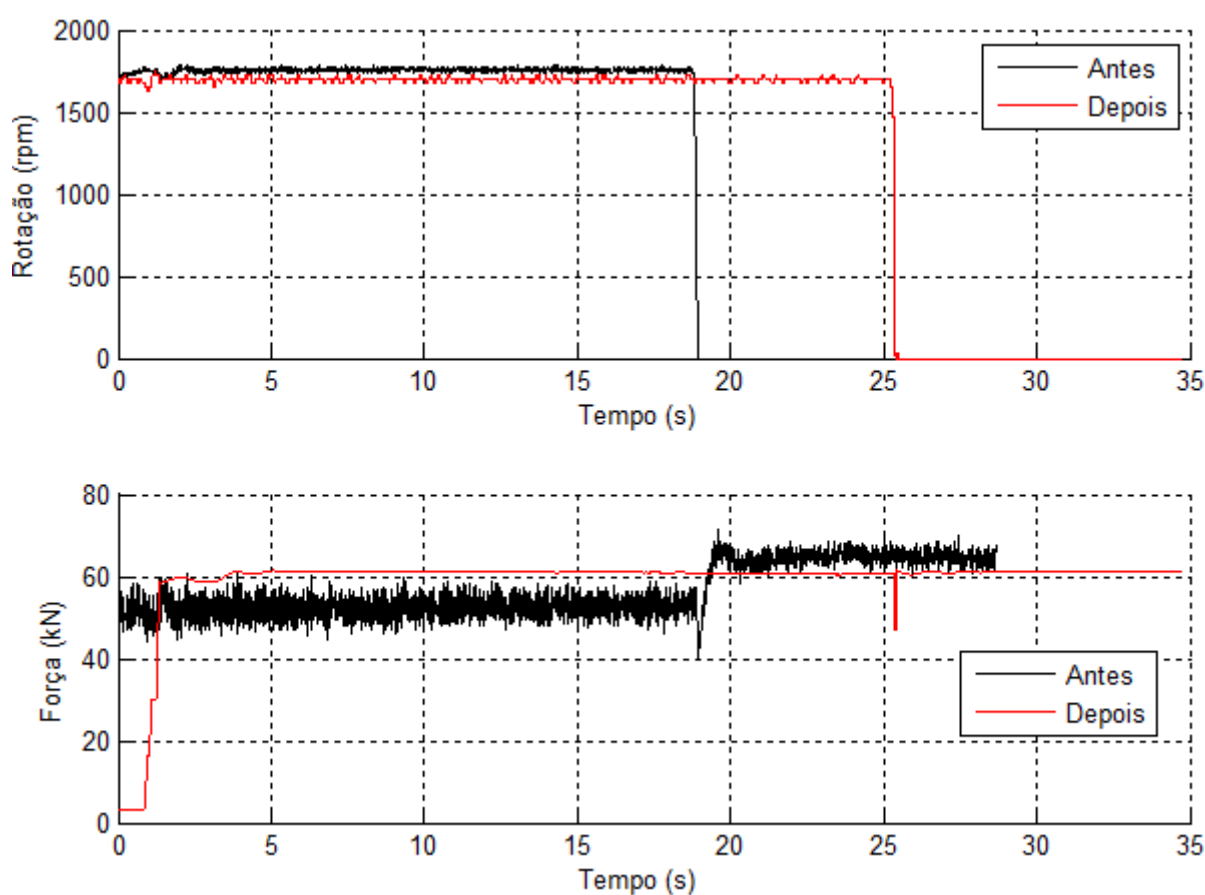


Figura 5.33 – Desempenho do controle de força e rotação da UPPA3 antes e depois da implementação do novo sistema

Na Figura 5.33, pode ser observado que anteriormente a rotação apresentava um *offset* de aproximadamente 60 rpm para o *setpoint* de 1.700 rpm. Esse erro é, provavelmente, resultante de ligações elétricas que não priorizaram a proteção contra ruídos e o aterramento correto, que fazia com que houvesse diferença entre o potencial de terra do CLP e do cartão PID. Como o terra é a referência para o sinal analógico de rotação proveniente do conversor

de frequência em tensão, isso fazia com que o sinal adquirido pelo cartão PID tivesse uma amplitude diferente do adquirido pelo CLP, provocando esse erro na medição. Como esse erro era diferente para cada valor de rotação, não era possível eliminá-lo apenas mudando a curva de calibração do conversor, mas sim refazendo todas as ligações elétricas seguindo os procedimentos corretos para reduzir o nível de ruídos nos sinais e evitar a diferença de potencial de terra. Porém, isso não foi feito, já que, de acordo com a metodologia de reestruturação apresentada na seção 4.1, de qualquer forma todo o sistema anterior seria posteriormente substituído pelo sistema atual.

Como pode ser observado na Figura 5.33, a força também apresentava um *offset* de aproximadamente 8 kN, provavelmente pelo mesmo motivo descrito para o sistema de rotação, ou seja, diferença de potencial de terra entre o CLP e o respectivo cartão PID. No caso da medição de força, pode ser observado ainda que durante a etapa de forjamento, ou seja, com a rotação igual a zero, esse *offset* mudava, provavelmente, pela mudança no nível de ruídos elétricos ou mesmo pela variação da diferença de potencial de terra. Pode ser observada ainda a grande oscilação do sinal medido de força, de aproximadamente 15 kN, ou seja, 25% do *setpoint*, sendo que com o sistema de controle atual essa oscilação é inferior a 2,5%. Provavelmente, isso seja resultado da presença de ruídos elétricos no sistema de controle anterior.

No sistema de controle atual todos os sinais são medidos e tratados pelo CLP, todas as ligações elétricas foram feitas de acordo com o procedimento correto para evitar a diferença de potencial de terra e foi feita a blindagem dos sinais analógicos. Assim, os problemas de ruídos elétricos que dificultavam e limitavam o sistema de controle foram reduzidos consideravelmente, como pode ser visto na Figura 5.33. Além disso, no sistema atual a rotação é obtida a partir da medição direta da frequência de pulsos do respectivo sensor pelo CLP, eliminando a necessidade do conversor de frequência em tensão e, conseqüentemente, os erros cometidos por ele devido à sua incerteza associada ao processo de conversão e ao efeito de *ripple*.

Outra diferença em relação ao sistema atual é que o programa supervisor anterior começava o salvamento dos dados somente a partir do momento em que a força atingia um valor maior que 50 kN. Assim, nos ensaios com o sistema de controle anterior os dados obtidos durante o tempo de subida da força não eram registrados e essas informações eram perdidas. A importância dessas informações está no acompanhamento da evolução do torque no exato instante em que acontece o contato entre pino e bloco, já que esse é um dos pontos

mais críticos em termos de controle do processo devido à grande variação desse parâmetro em um curto espaço de tempo nessa etapa.

Para que o programa supervisor do sistema anterior passasse a armazenar os dados durante o tempo de subida da força, foi necessário fazer uma modificação no mesmo. Isso foi feito com o objetivo de comparar o desempenho do controle de força antes e depois da implementação do novo sistema.

Na Figura 5.34 são mostrados os resultados obtidos no controle de força antes e depois da implementação do novo sistema no início de um ensaio com força de 100 kN e rotação de 1.700 rpm, utilizando a geometria “A”. Nos dois casos, o tempo começou a ser registrado a partir do momento em que a força atingiu o valor de 15 kN, para garantir que já havia acontecido o contato entre pino e bloco e que, conseqüentemente, o controlador de força já havia sido ativado.

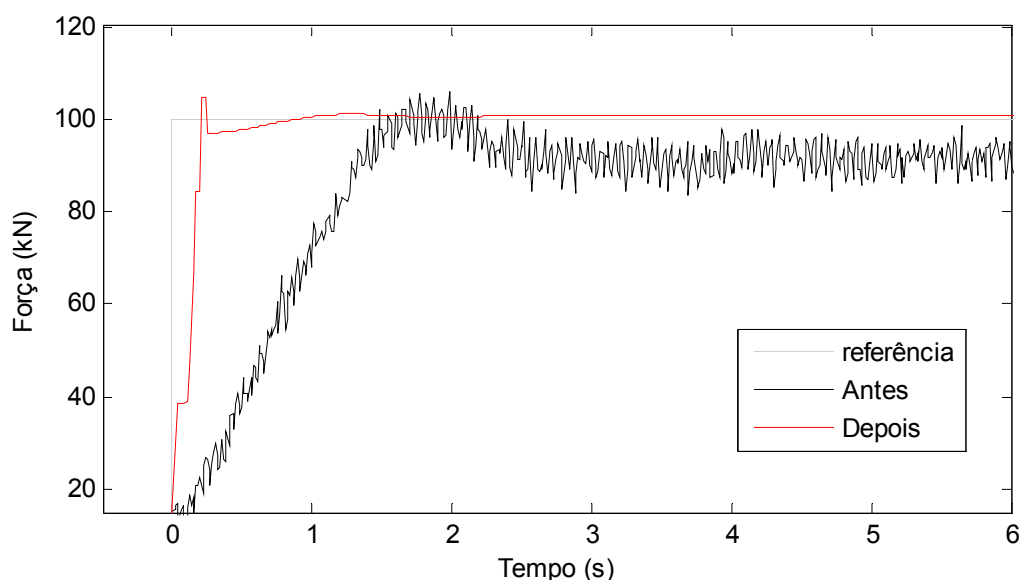


Figura 5.34 – Desempenho do controle de força antes e depois da implementação do novo sistema

Na resposta apresentada no gráfico da Figura 5.34, o tempo de subida da força do sistema anterior foi de aproximadamente 1,5 s, porém o *settling time* (critério de 5%) não foi atingido. Depois da implementação do novo sistema de controle, o *settling time* foi atingido em 0,22 s, e a partir do instante de tempo de 0,72 s a força foi controlada com um erro menor que 1 kN, ou seja, 1% do *setpoint*. Já no sistema anterior, a oscilação chegou a atingir valores maiores que 16 kN e em nenhum momento o controle pôde ser mantido com um erro menor

que 15 kN, ou seja, 15% do *setpoint*. Isso mostra a grande melhoria que foi promovida no controle de força da UPPA3 a partir do novo sistema implementado.

Para consolidar a capacidade de realização de ensaios de reparo por atrito abaixo do limite máximo de força no primeiro estágio e dentro da faixa operacional de rotação do sistema anterior (mostrados na seção 2.2), com o novo sistema de controle da UPPA3 foram realizados mais seis ensaios, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Ensaios de validação do novo sistema controle da UPPA3

Ensaio	Geometria	Rotação (rpm)	Força do 1º estágio (kN)	Comp. de queima do 1º estágio (mm)	Força do 2º estágio (kN)	Comp. de queima do 2º estágio (mm)	Força de forjamento (kN)	Tempo de Forjamento (s)
V1	A	1.700	100	7	-	-	100	10
V2	B	1.700	100	7	-	-	100	10
V3	B	1.700	50	4	100	4	0	0
V4	A	1.700	50	4	100	4	150	10
V5	A	1.700	60	7	-	-	60	10
V6	A	1.700	60	7	-	-	60	10

O resultado obtido no ensaio V1 pode ser visto na Figura 5.35. Apesar de a rotação ter apresentado uma pequena oscilação no instante em que ocorre o contato entre pino e bloco e a força é aplicada, ela não chegou a obter uma amplitude maior que 100 rpm e, portanto, o sistema antitravamento não foi ativado. Com o sistema de controle de rotação anterior, ensaios com força de 100 kN, como esse, eram muitas vezes suficientes para provocar o travamento do motor hidráulico, como mostrado no trabalho de Borges (2011). Porém, pelo resultado obtido, com o novo sistema esses ensaios podem ser realizados com uma probabilidade muito pequena de ocorrer o travamento, já que o sistema de não teve grandes dificuldades para manter a rotação, tanto que o sistema antitravamento nem foi ativado.

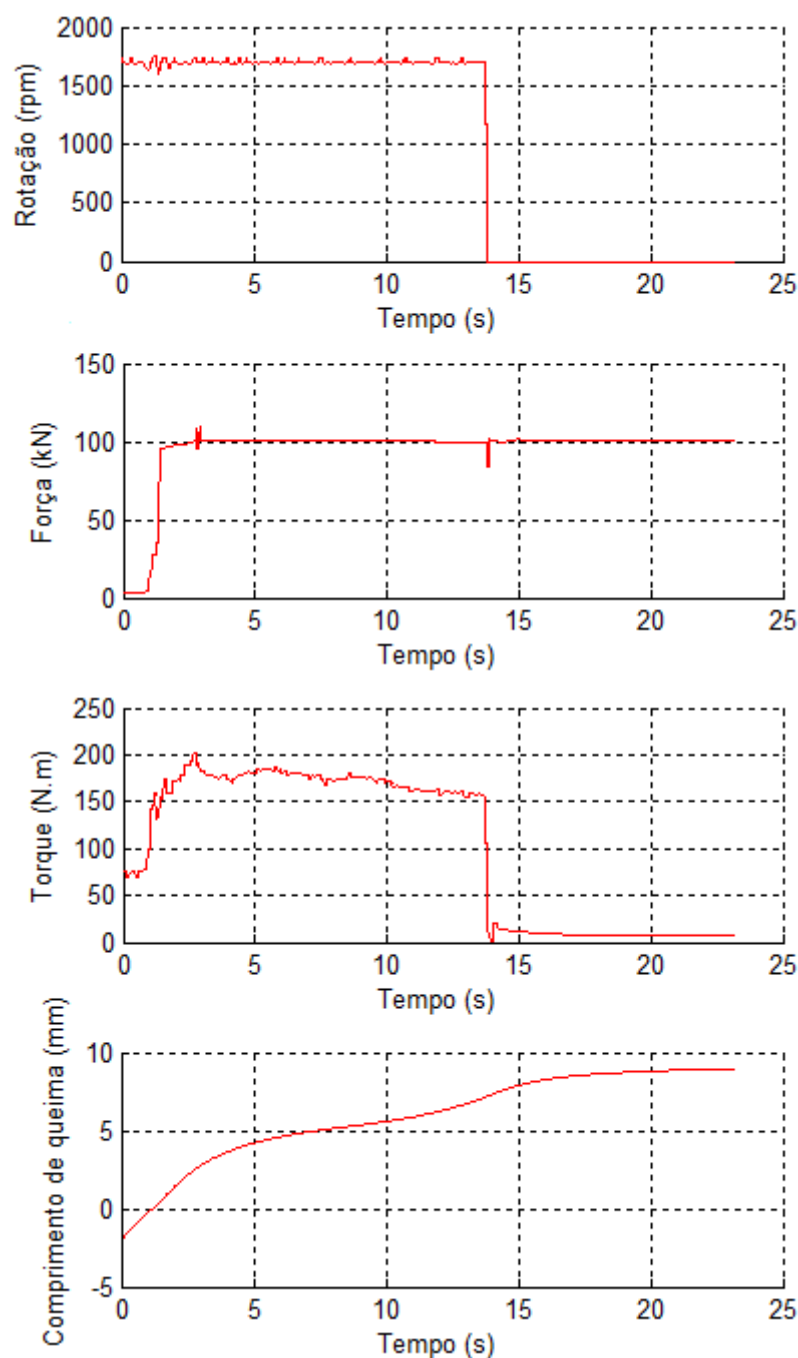


Figura 5.35 – Resultado obtido no ensaio V1: geometria “A”, rotação de 1.700 rpm e força do primeiro estágio de 100 kN

Para o resultado do ensaio V1, mostrado na Figura 5.35, o *settling time* de força (critério de 5%) foi atingido em 0,24 s a partir do momento em que houve o contato entre pino e bloco, porém houve uma oscilação de quase 10 kN próximo ao instante de tempo de 2,8 s. Existem duas hipóteses que foram levantadas para explicar o que pode ter causado essa oscilação. Uma delas está relacionada com os efeitos do próprio processo de reparo, já que

com o aquecimento do material devido ao atrito, sua resistência diminui, provocando uma mudança no comportamento do sistema. Nesse caso, o cilindro hidráulico deve avançar mais rápido para que a força seja atingida. Porém, quando ele avança, ele expulsa o material que está na região mais aquecida, que é a mais próxima do contato entre pino e bloco, fazendo com que, conseqüentemente, fique apenas o material com menor temperatura e maior resistência. Assim, é necessário avançar o cilindro mais lentamente para que a força não exceda o valor desejado, sendo que a oscilação da força pode ter ocorrido durante esse ciclo.

A outra hipótese pode ser considerada uma associação da primeira com a incerteza do sistema de medição de força que, como mencionado anteriormente, é de 13 kN. Assim, pequenas oscilações de força podem fazer com que o respectivo sistema de medição apresente uma variação maior que a real, já que ele não está preparado para identificar com exatidão uma variação menor que 13 kN. Se isso for considerado, oscilações de até 13 kN podem ser consideradas normais.

No resultado apresentado na Figura 5.35, apesar de a força ter apresentado uma oscilação, ela passou rapidamente e foi menor que a incerteza do respectivo sistema de medição. Depois dessa oscilação a força ficou controlada com um erro menor que 1 kN, ou seja, 1% do *setpoint*. Essa oscilação também apareceu no resultado do ensaio V2, mostrado na Figura 5.36, porém na etapa de forjamento. Nos demais ensaios realizados, essa oscilação da força não apareceu. Tudo isso mostra que esse é um fenômeno aleatório e ocorre eventualmente, podendo estar relacionado com os efeitos associados ao processo de reparo e/ou ao sistema de medição de força. Deve ser destacado ainda que, como mencionado anteriormente, a oscilação da força no início da etapa de forjamento é resultante de um distúrbio provocado na linha hidráulica quando o sistema de rotação é desativado.

No ensaio V2 (Figura 5.36), apesar de ter sido utilizada uma geometria diferente da utilizada no ensaio V1 (Figura 5.35), pode ser observado que os resultados foram quase idênticos. Em ambos, a oscilação da rotação no instante do contato entre pino e bloco não foi suficiente para acionar o sistema antitravamento e o comprimento de queima final foi praticamente o mesmo. O torque atingiu valores máximos próximos de 200 N.m, porém o torque obtido no ensaio V1 foi um pouco menor que o obtido no ensaio V2, provavelmente pelo fato de a geometria utilizada neste último ser um pouco maior.

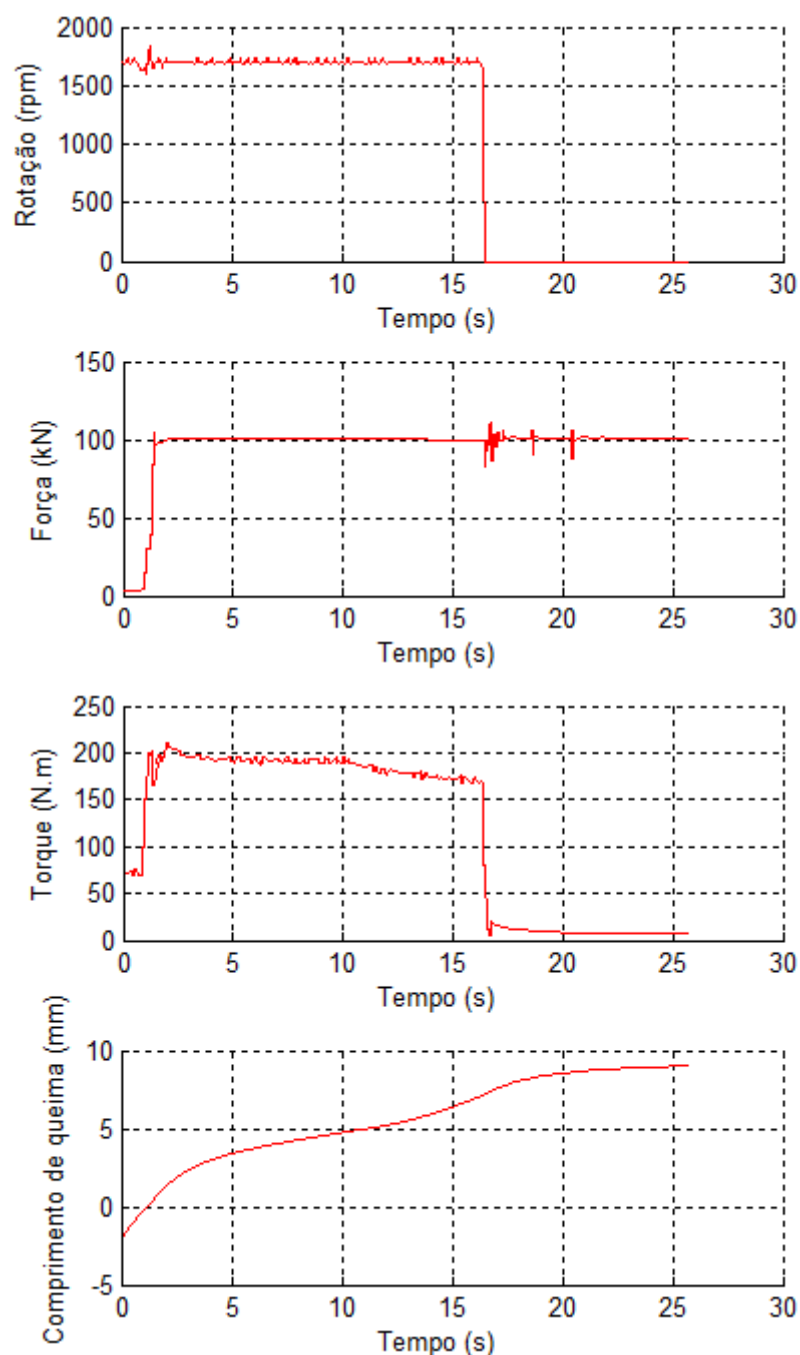


Figura 5.36 – Resultado obtido no ensaio V2: geometria “B”, rotação de 1.700 rpm e força do primeiro estágio de 100 kN

Para os ensaios V3 e V4, a força utilizada no primeiro estágio foi de 50 kN, que é um pouco menor que o limite mínimo do sistema anterior da UPPA3, que era de 60 kN. O resultado obtido para o ensaio V3 pode ser visto na Figura 5.37. Para o ensaio V4, mostrado na Figura 5.38, o que mudou foi a presença do forjamento e a geometria.

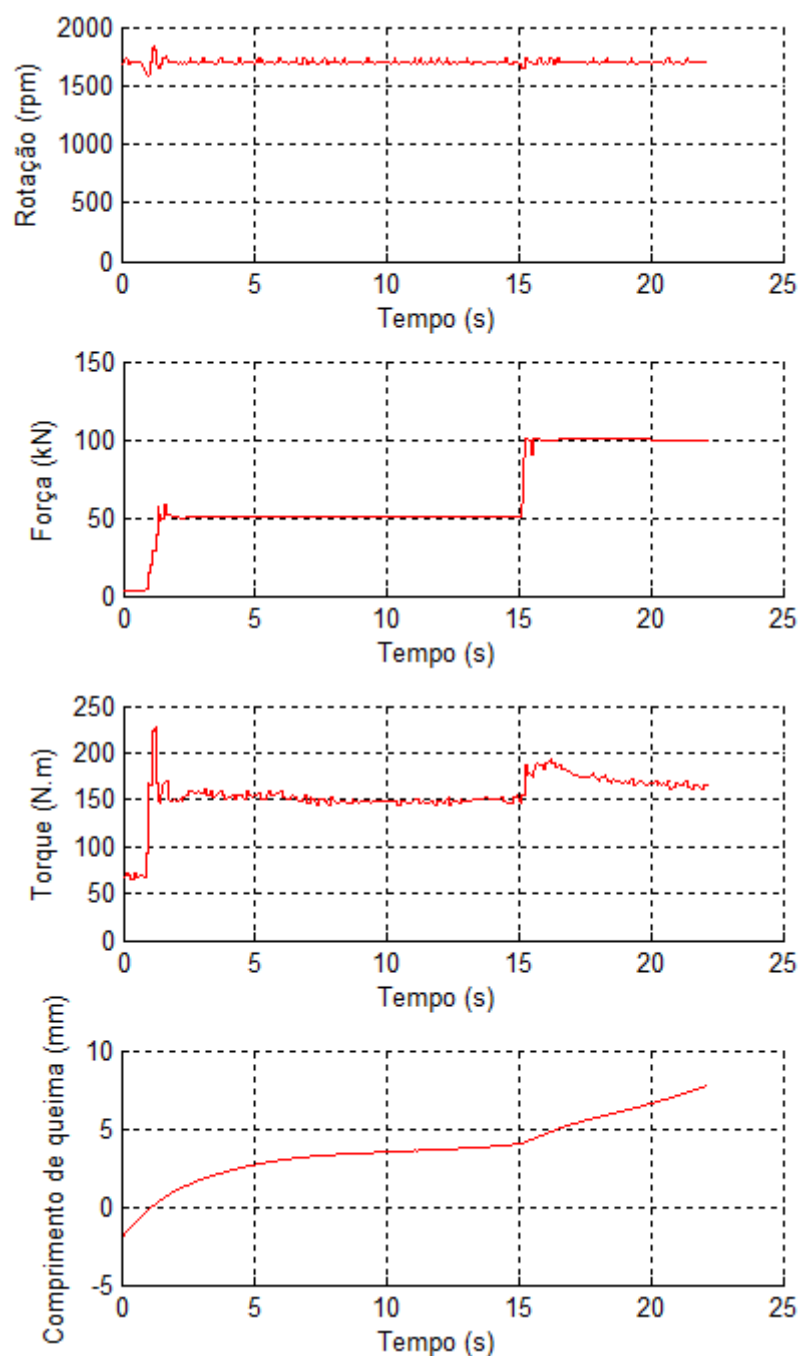


Figura 5.37 – Resultado obtido no ensaio V3: geometria “B”

No ensaio V3 (Figura 5.37), no instante do contato entre pino e bloco a rotação chegou a atingir um valor de mais de 100 rpm abaixo do *setpoint* de 1.700 rpm, ou seja, ficou menor que 1.600 rpm. Portanto, nesse instante o sistema antitravamento foi acionado. Porém, como rotação se recuperou rapidamente, o sistema antitravamento ficou acionado por apenas 40 ms e não trouxe nenhuma desvantagem para o ensaio, tanto que o comportamento da força foi praticamente o mesmo dos ensaio V4 (Figura 5.38), no qual o sistema antitravamento não

chegou a atuar. Pode ser observado ainda que, no instante do contato entre pino e bloco, o torque chegou a atingir mais de 220 N.m no ensaio V3, sendo que no ensaio V4 ele não chegou a atingir nem mesmo 200 N.m. Isso pode explicar o motivo de a rotação ter obtido uma oscilação levemente maior no ensaio V3.

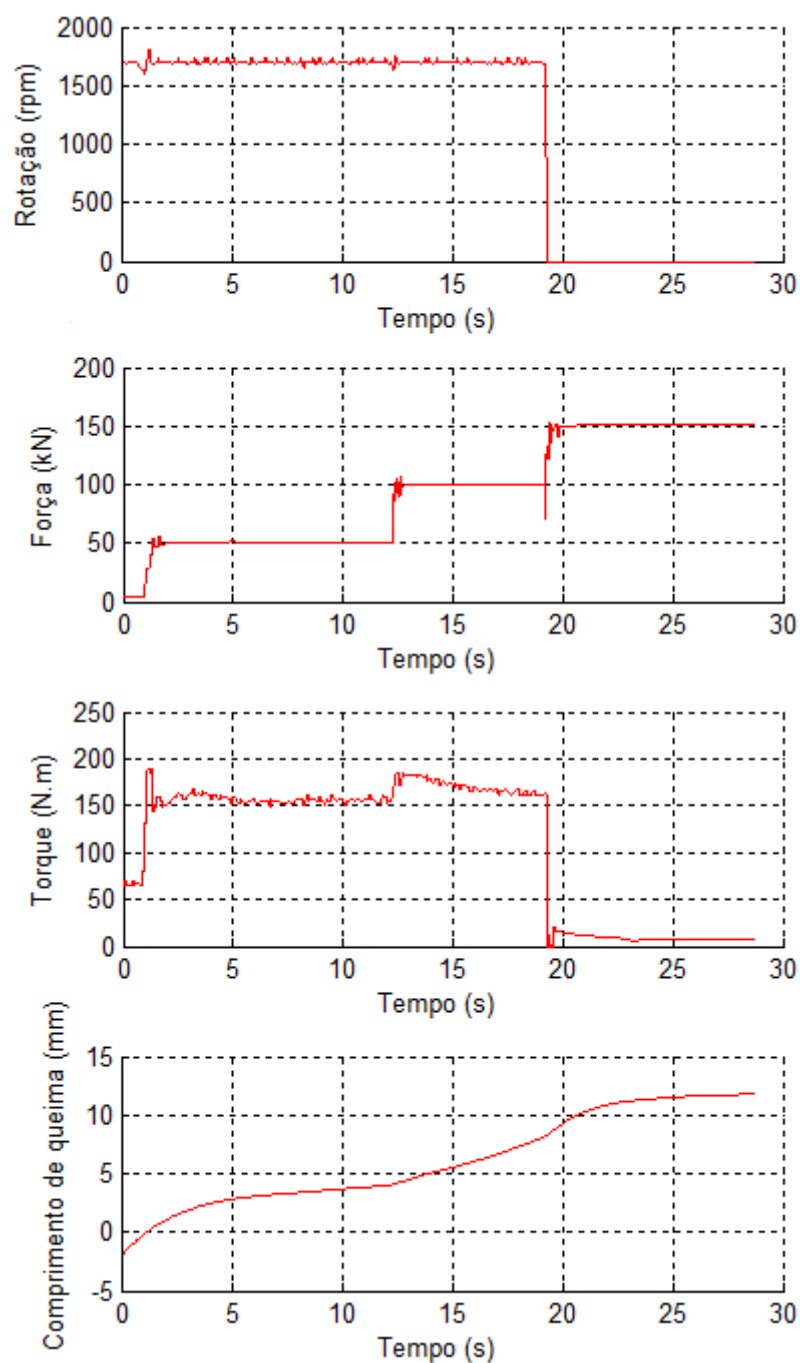


Figura 5.38 – Resultado obtido no ensaio V4: geometria “A”

Os ensaios V5 e V6 foram realizados em condições de força e rotação idênticas, para verificar o comportamento do sistema na situação que era mais comum nos reparos por atrito realizados com o sistema anterior, onde eram utilizados força de 60 kN e rotação de 1.700 rpm. No resultado do ensaio V5, mostrado na Figura 5.39, o torque atingiu um valor de pico um pouco menor que o obtido no ensaio V6, mostrado na Figura 5.40, no instante do contato entre pino e bloco.

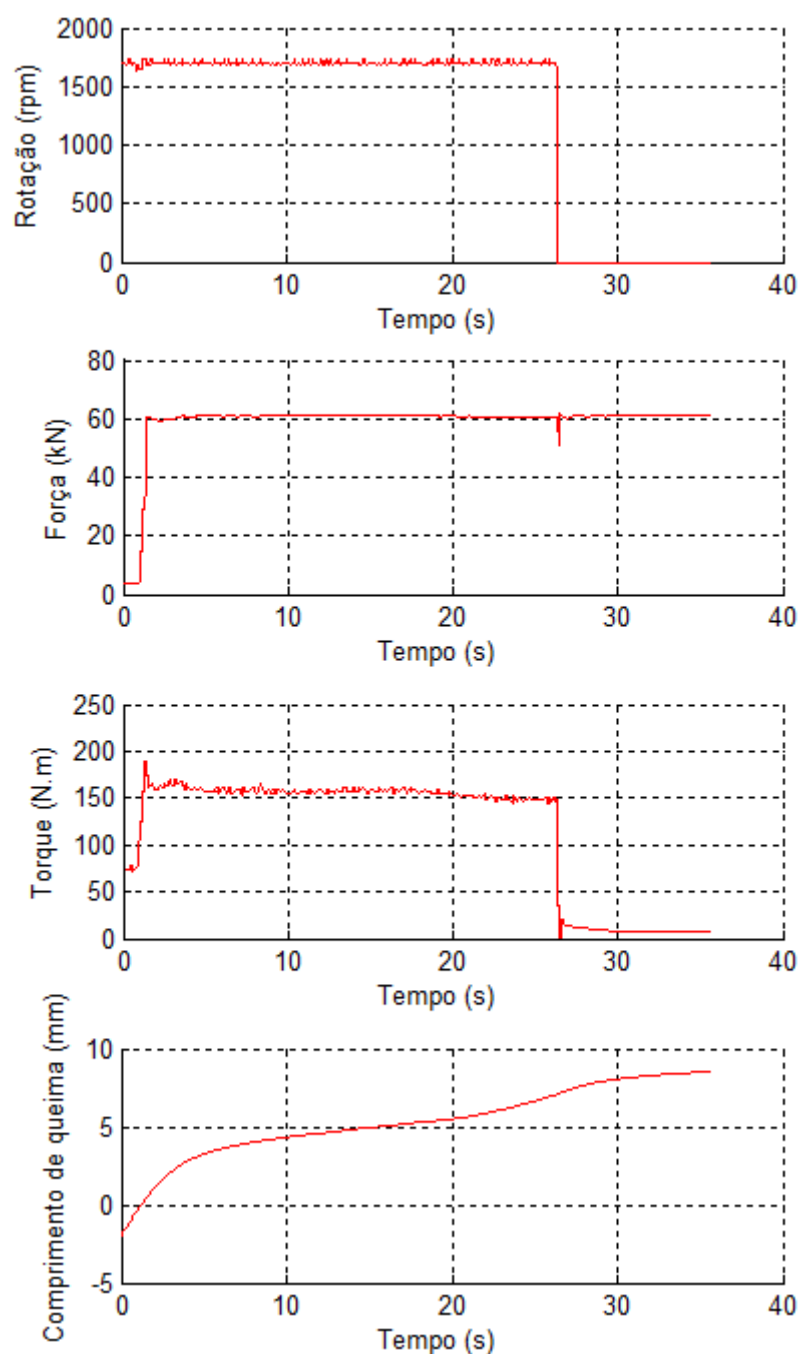


Figura 5.39 – Resultado obtido no ensaio V5: força de 60 kN e rotação de 1.700 rpm

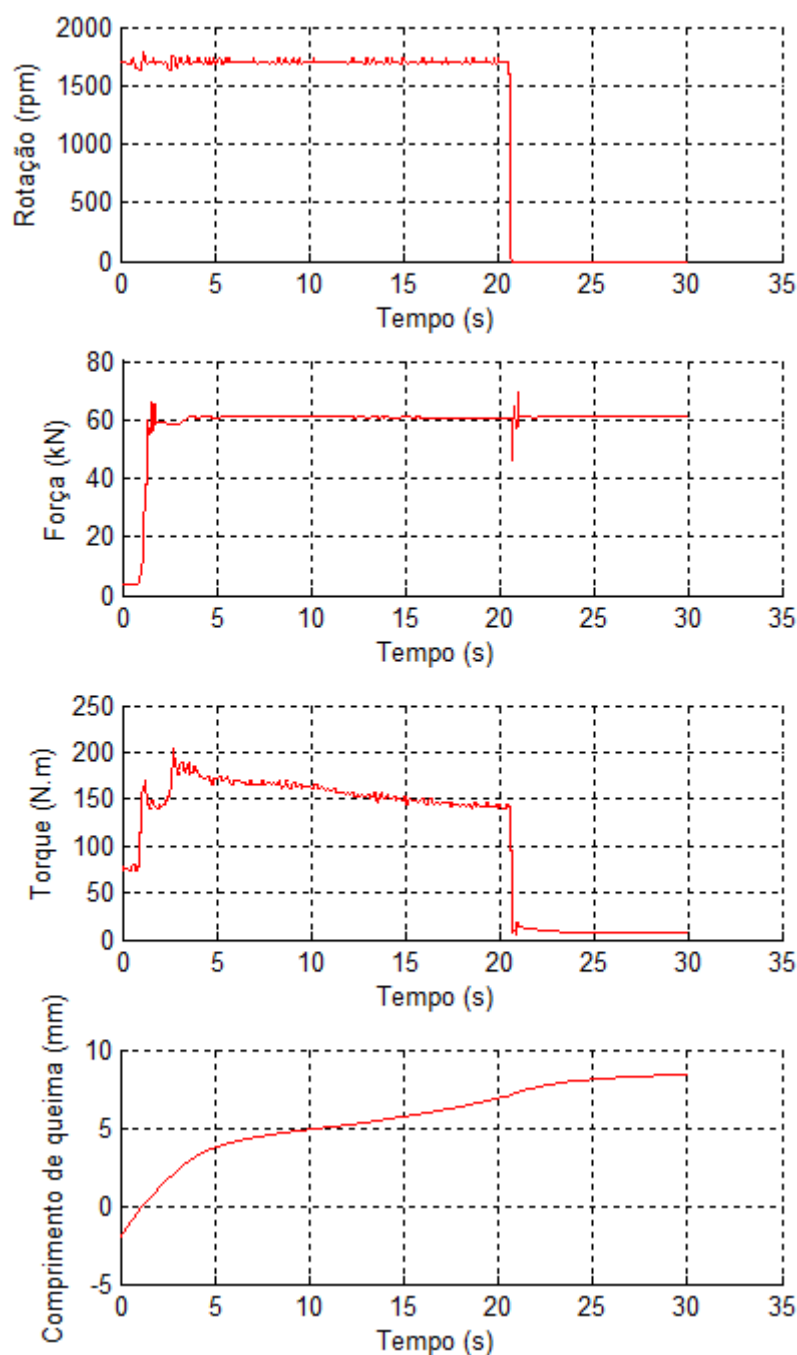


Figura 5.40 – Resultado obtido no ensaio V6: força de 60 kN e rotação de 1.700 rpm

Nos ensaios V5 (Figura 5.39) e V6 (Figura 5.40), pode ser observado que o comprimento de queima final foi praticamente o mesmo. Nesses dois ensaios, o sistema antitravamento não atuou, já que as oscilações de rotação foram bem pequenas e não extrapolaram o limite mínimo estabelecido para o acionamento do mesmo.

Depois de feito o comparativo do desempenho dos sistemas de força e rotação e realizados os ensaios de validação do novo sistema dentro da faixa operacional anterior da UPPA3, foram realizados ensaios em condições críticas. Esses ensaios foram realizados com elevadas forças e baixas rotações, buscando sempre obter os valores limites desses parâmetros para a garantia de execução completa do reparo com o novo sistema de controle. Assim, foram definidos os ensaios da Tabela 5.7 para definir a nova faixa operacional da UPPA3.

Tabela 5.7 – Ensaios executados para definir a nova faixa operacional da UPPA3

Nº do ensaio	Geometria	Rotação (rpm)	Força do 1º estágio (kN)	Comp. de queima do 1º estágio (mm)	Força do 2º estágio (kN)	Comp. de queima do 2º estágio (mm)	Força de forjamento (kN)	Tempo de Forjamento (s)
F1	A	1.700	200	7	-	-	200	10
F2	A	1.700	300	7	-	-	300	10
F3	B	1.700	300	18	-	-	300	5
F4	B	1.700	250	18	-	-	250	5
F5	C	1.700	200	9	400	9	400	5
F6	A	1.000	40	7	-	-	40	10
F7	C	1.200	50	7	-	-	50	10

Os ensaios F1 e F2 foram executados com o intuito de obter o limite máximo de força com o qual o novo sistema de controle da UPPA3 é capaz de executar por completo o reparo por atrito, onde o comprimento de queima foi de 7 mm, que é comumente utilizado nos reparos, e a rotação foi de 1.700 rpm.

No ensaio F1, cujo resultado é mostrado na Figura 5.41, a amplitude da oscilação máxima de rotação quando ocorreu o contato entre pino e bloco foi de 124 rpm, que fez com que o sistema antitravamento fosse acionado por um breve momento. Nesse instante, o pico de torque medido chegou a 266 N.m. Porém, o tempo de resposta do sensor de torque, de acordo com seu respectivo manual, é de 33 ms e sabe-se que o pico de torque ocorre muito rapidamente, sendo que, assim, esse torque pode ter atingido valores maiores, que só não foram captados por conta da velocidade de resposta do sensor.

No resultado da Figura 5.41, depois de ter havido o contato entre pino e bloco, a força atingiu o valor de 200 kN em 0,6 s. Em seguida, a força ficou controlada com um erro máximo de 1%, que só foi ultrapassado durante o distúrbio gerado quando o sistema de rotação foi desativado no início da etapa de forjamento. Pode ser observado ainda que quando

houve o contato entre pino e bloco, o material ofereceu pouca resistência, o que fez com que o comprimento de queima aumentasse muito rapidamente no início do processo. Porém, em seguida o material aumentou sua resistência fazendo com que o comprimento de queima aumentasse mais lentamente.

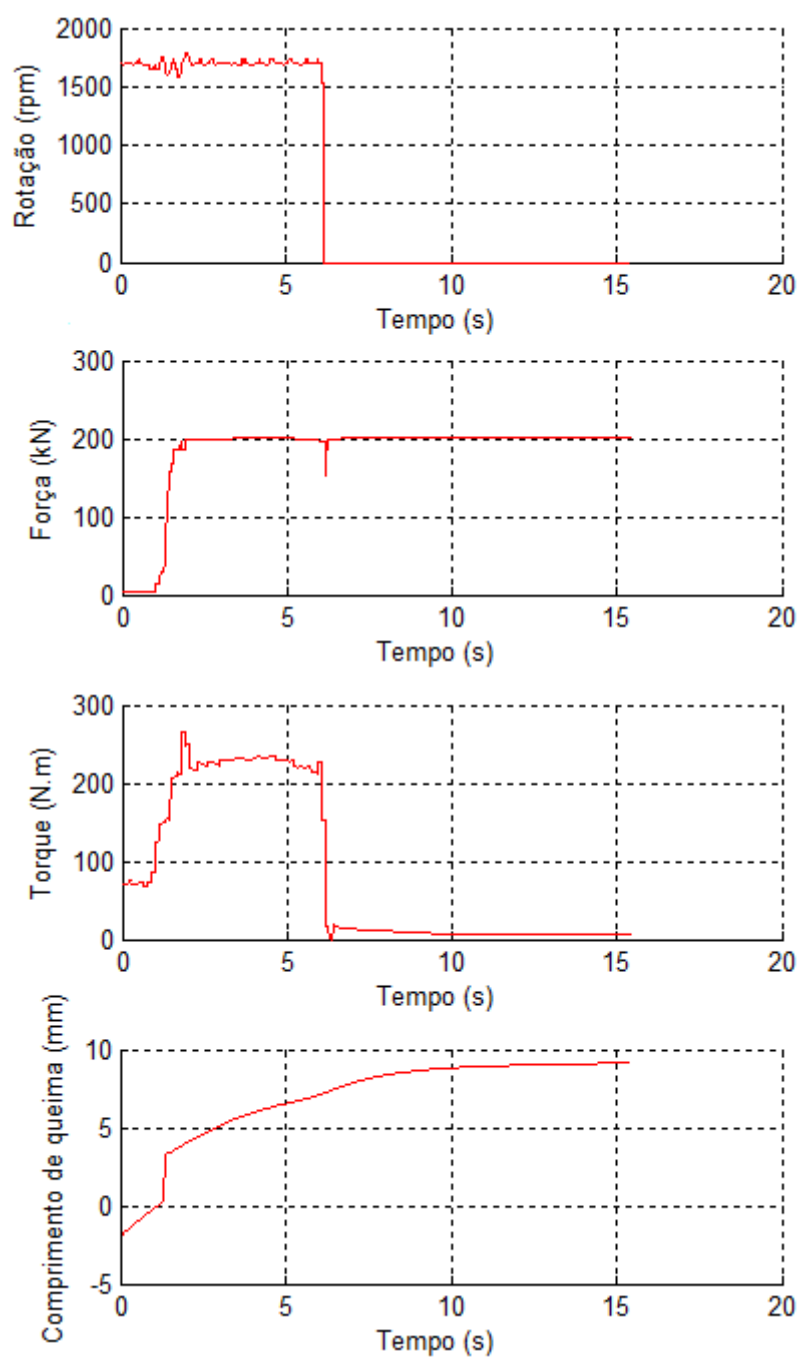


Figura 5.41 – Resultado obtido no ensaio F1: força de 200 kN e comprimento de queima de 7 mm

Como no ensaio F1 não houve grandes problemas no controle de rotação, foi realizado o ensaio F2 com uma força maior, de 300 kN, cujo resultado é apresentado na Figura 5.42.

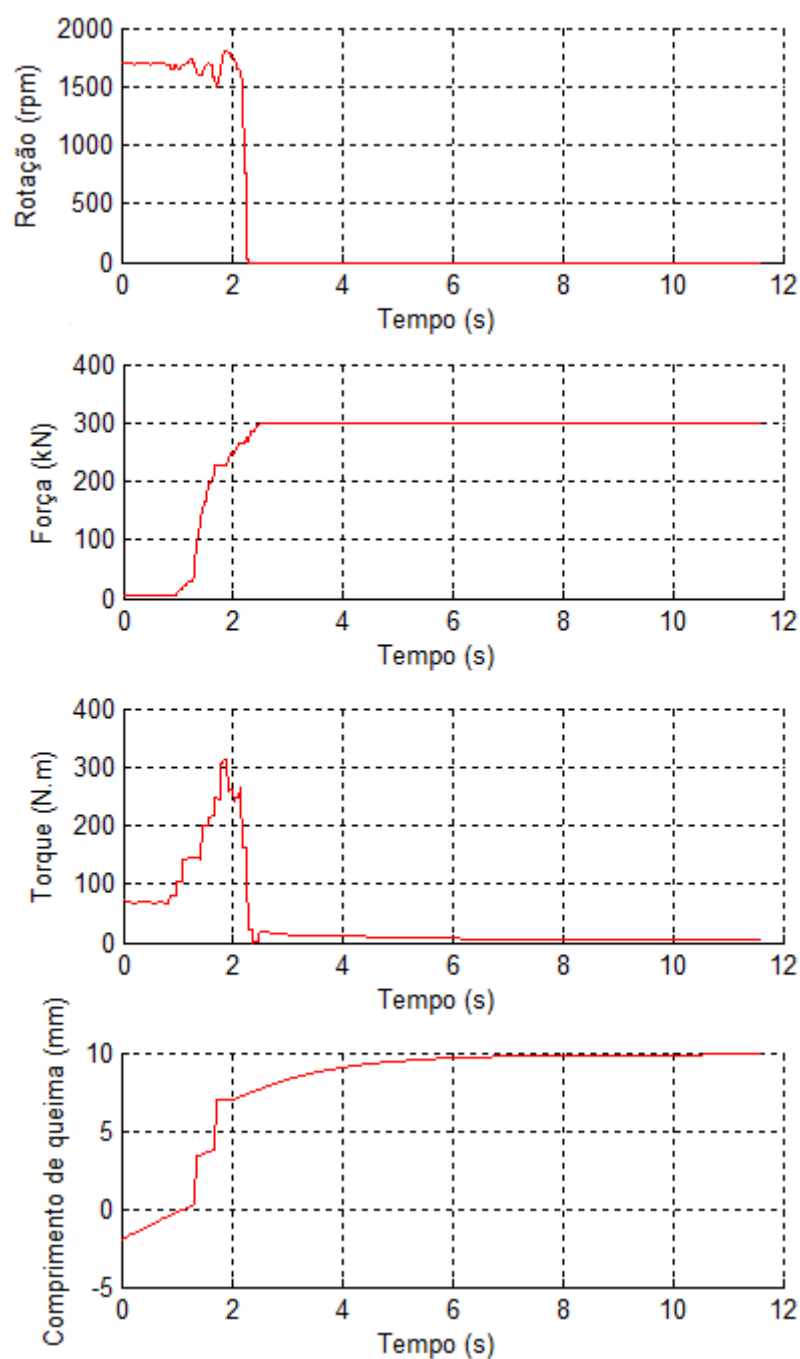


Figura 5.42 – Resultado obtido no ensaio F2: força de 300 kN e comprimento de queima de 7 mm

No ensaio F2 (Figura 5.42), pode ser observado que o torque atingiu valores acima de 300 N.m, o que fez com que a rotação tivesse oscilações de até 200 rpm em relação ao

setpoint e o sistema antitravamento fosse acionado nesse momento. Apesar disso, não houve travamento do sistema de rotação e o ensaio pôde ser completado. Porém, o comprimento de queima de 7 mm foi atingido rapidamente, assim, a partir do momento em que houve o contato entre pino e bloco, o primeiro estágio foi encerrado em 0,84 s, que foi o tempo suficiente para que a força atingisse 250 kN. Como o primeiro estágio foi finalizado muito rapidamente, a força de ensaio só foi atingida durante a etapa de forjamento, 0,5 s depois que ela foi iniciada, sendo que, a partir de então, o erro de força ficou inferior a 0,3% do *setpoint*.

Como no ensaio F2 o *setpoint* de força não foi atingido no primeiro estágio por causa da velocidade muito alta de aumento do comprimento de queima, foi selecionada uma geometria mais robusta, ou seja, cujo pino tem diâmetro maior, para a realização do ensaio seguinte, que foi denominado F3. Foi utilizada nesse ensaio a geometria “B”, que tem os diâmetros do pino e do furo maiores que os da geometria “A”. Além disso, foi selecionado também um comprimento de queima maior para o ensaio F3, de 18 mm, para evitar que o primeiro estágio terminasse antes que a força de ensaio fosse atingida.

Como pode ser visto no resultado do ensaio F3, mostrado na Figura 5.43, também houve um aumento rápido do comprimento de queima no início do processo. Porém esse rápido aumento cessou por volta de 3,8 mm, diferentemente do ensaio F2, onde houve dois aumentos rápidos sucessivos do comprimento de queima, que continuaram até atingir um valor próximo de 7 mm. Isso certamente se deve ao maior diâmetro do pino com geometria “B” que foi utilizado no ensaio F3, conferindo maior resistência ao mesmo em relação ao utilizado no ensaio F2.

No ensaio F3 houve o travamento do sistema de rotação devido ao aumento excessivo do torque que, como pode ser observado na Figura 5.43, atingiu valores de até 550 N.m. Pode-se observar ainda que antes de o comprimento de queima chegar a zero, identificando, teoricamente, o contato entre pino e bloco, o torque já havia atingido valores acima de 200 N.m, sendo que em todos os outros ensaios ele foi de aproximadamente 70 N.m. Além disso, quando o comprimento de queima atingiu zero, a força já estava com um valor de aproximadamente 100 kN, o que mostra que o contato entre pino e bloco ocorreu efetivamente em um instante anterior a esse. Assim, quando os dados começaram a ser salvos, a força já estava com um valor maior que 15 kN e, portanto, já havia ocorrido o contato entre pino e bloco, o que explica um torque maior que o normal no início. Isso pode ter acontecido por causa de imperfeições nas geometrias do pino e do furo ou mesmo por um desalinhamento entre eles na montagem. Depois de o comprimento de queima ter atingido o valor zero, o

controlador de força foi ativado e o torque rapidamente atingiu valores acima de 500 N.m, o que fez com que a rotação sofresse oscilações de mais de 400 rpm seguida do travamento do motor hidráulico, que não pôde ser evitado nem mesmo com a atuação do sistema antitravamento.

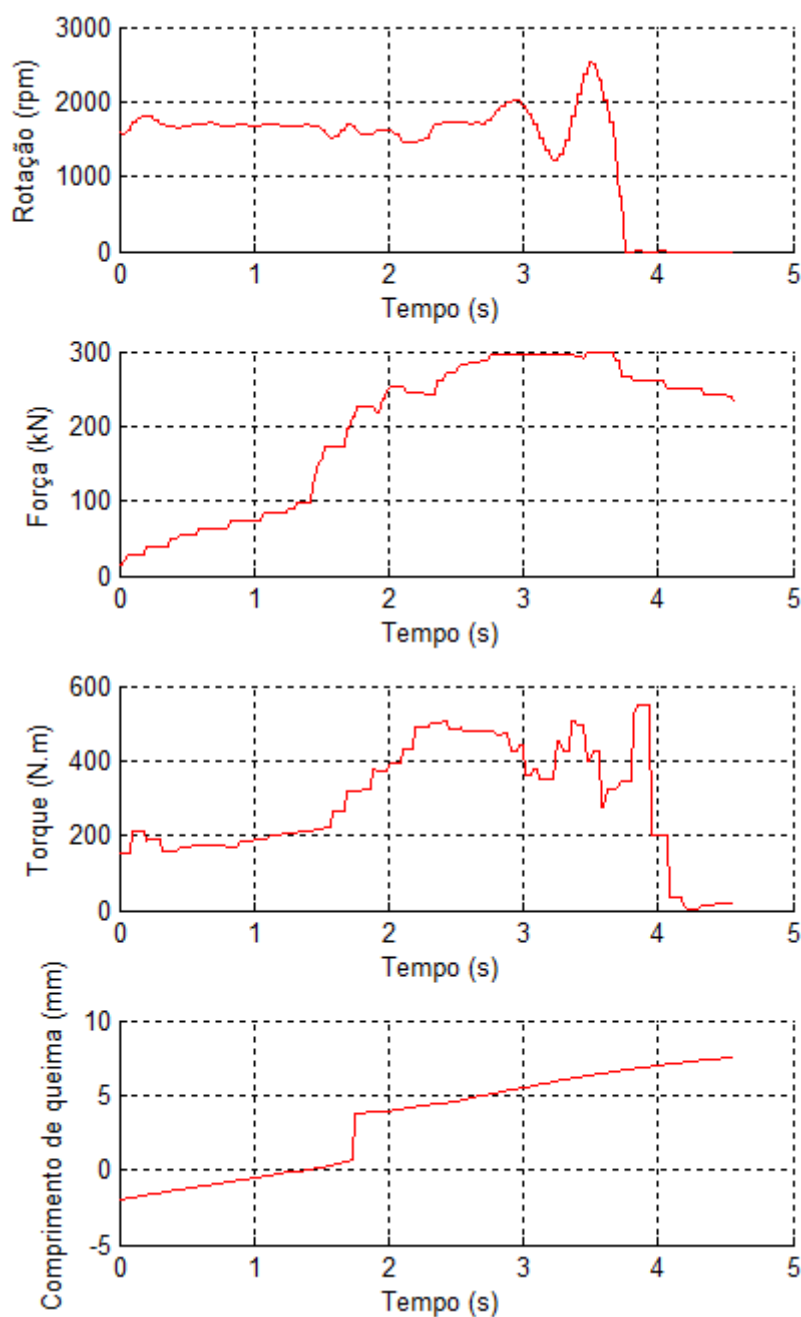


Figura 5.43 – Resultado obtido no ensaio F3: força de 300 kN e comprimento de queima de 18 mm

Como descrito na seção 4.5, o sistema antitravamento atua apenas fechando a válvula do sistema de força, impedindo que ela aumente e permitindo que a rotação se recupere. Porém, como descrito nessa mesma seção, quando a rotação diminui, o calor gerado pelo atrito também diminui e, conseqüentemente, o material aumenta sua rigidez, aumentando o torque, que provoca, em seguida, outra redução na rotação, sendo que esse processo leva rapidamente ao travamento. Isso descreve o que ocorreu durante o ensaio F3.

Como pode ser visto na Figura 5.43, o travamento ocorreu aproximadamente 2,34 s depois do contato entre pino e bloco, 1,0 s depois que força de ensaio de 300 kN foi atingida e quando o comprimento de queima havia chegado a 6,7 mm. A partir desse resultado, pode ser notado que, na UPPA3, utilizando a força de 300 kN, a rotação de 1.700 rpm e um comprimento de queima menor ou igual a 6 mm, há uma boa chance de que não ocorra o travamento do sistema de rotação. Assim, foi definido esse como sendo o primeiro limite operacional da UPPA3 depois de implementado o novo sistema de controle.

Para definir o limite de força utilizando a rotação de 1.700 rpm e um comprimento de queima maior que 6 mm, foi executado o ensaio F4, onde foram adotados um comprimento de queima de 18 mm e uma força de 250 kN, utilizando também a geometria “B”. O resultado desse ensaio é apresentado na Figura 5.44, onde pode ser visto que o torque atingiu valores de até 400 N.m. Pode ser observado ainda que nos momentos em que o torque foi maior, ocorreram oscilações na rotação de até 260 rpm, fazendo com que o sistema antitravamento atuasse nesses momentos. Essa atuação do sistema antitravamento juntamente com o controle otimizado de rotação, realizado pela RN, permitiu que o ensaio pudesse ser completado sem que houvesse o travamento do motor hidráulico.

Ao fim do processo, o comprimento de queima atingido no ensaio F4 (Figura 5.44) após a etapa de forjamento foi de 22,4 mm. A força atingiu seu valor de *setpoint* 0,64 s depois do momento em que houve o contato entre pino e bloco. Depois disso, mesmo com o sistema antitravamento atuando, o erro de força ficou inferior a 5% durante todo o primeiro estágio. Durante a etapa de forjamento, como o sistema antitravamento não atuou mais, a força ficou com erro inferior a 0,4% do *setpoint* até o fim do reparo.

Como o ensaio F4 pôde ser concluído sem grandes problemas no controle de força e rotação, apesar da oscilação de até 15% nesta última, os parâmetros desse ensaio foram utilizados para definir a segunda faixa operacional da UPPA3. Assim, para a garantia de realização completa de ensaios com rotação de 1.700 rpm e comprimento de queima maior que 6 mm, a força máxima que pode ser utilizada é de 250 kN.

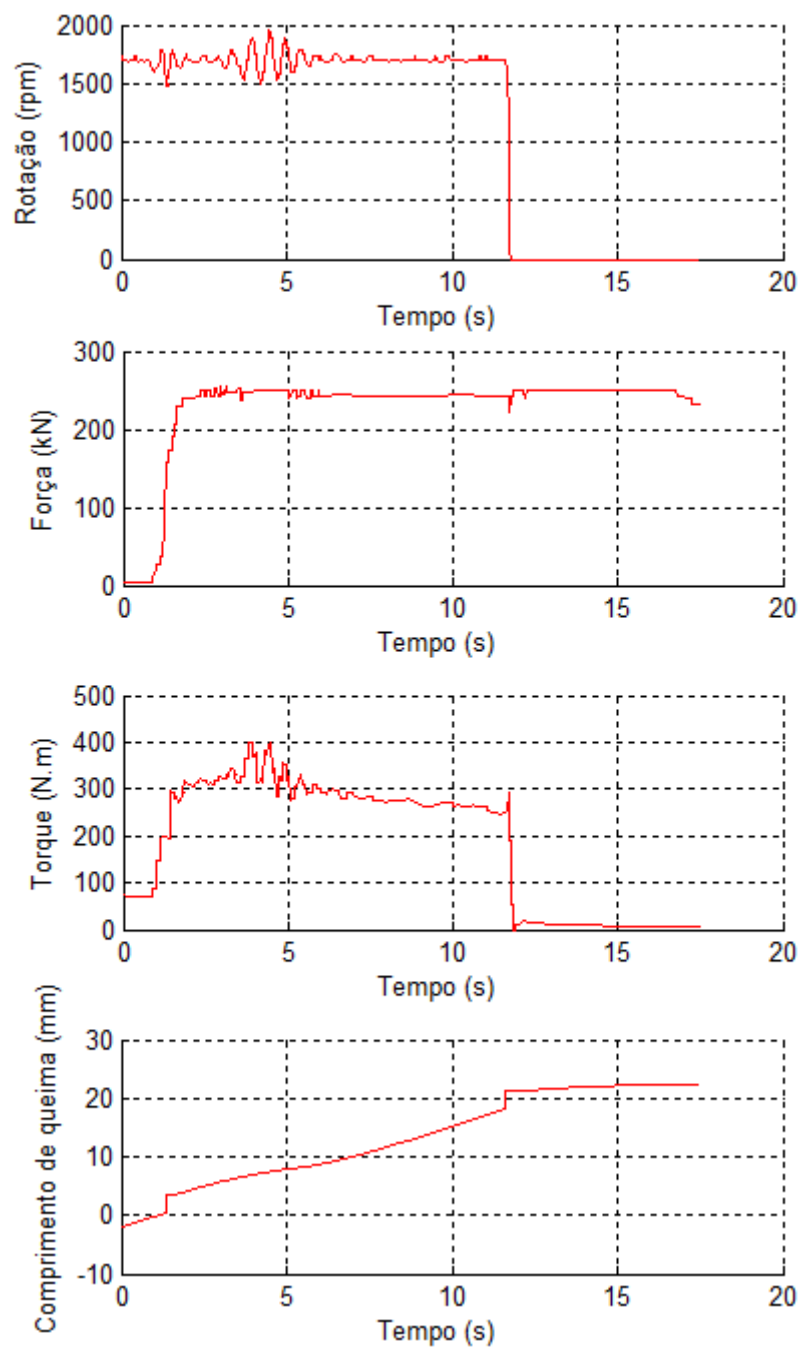


Figura 5.44 – Resultado obtido no ensaio F4: força de 250 kN e comprimento de queima de 18 mm

Depois de realizado o ensaio F4 e definida a força máxima para o primeiro estágio com rotação de 1.700 rpm, foi realizado o ensaio F5, buscando, para essa mesma rotação, a força máxima que poderia ser aplicada no segundo estágio. Para isso, a força utilizada para o primeiro estágio foi de 200 kN, com comprimento de queima de 9 mm, e do segundo estágio

foi a máxima permitida pelo equipamento, 400 kN, também com comprimento de queima de 9 mm.

O resultado do ensaio F5 é apresentado na Figura 5.45, onde o torque máximo foi de 315 N.m, atingido ainda no primeiro estágio, pouco tempo depois do contato entre pino e bloco.

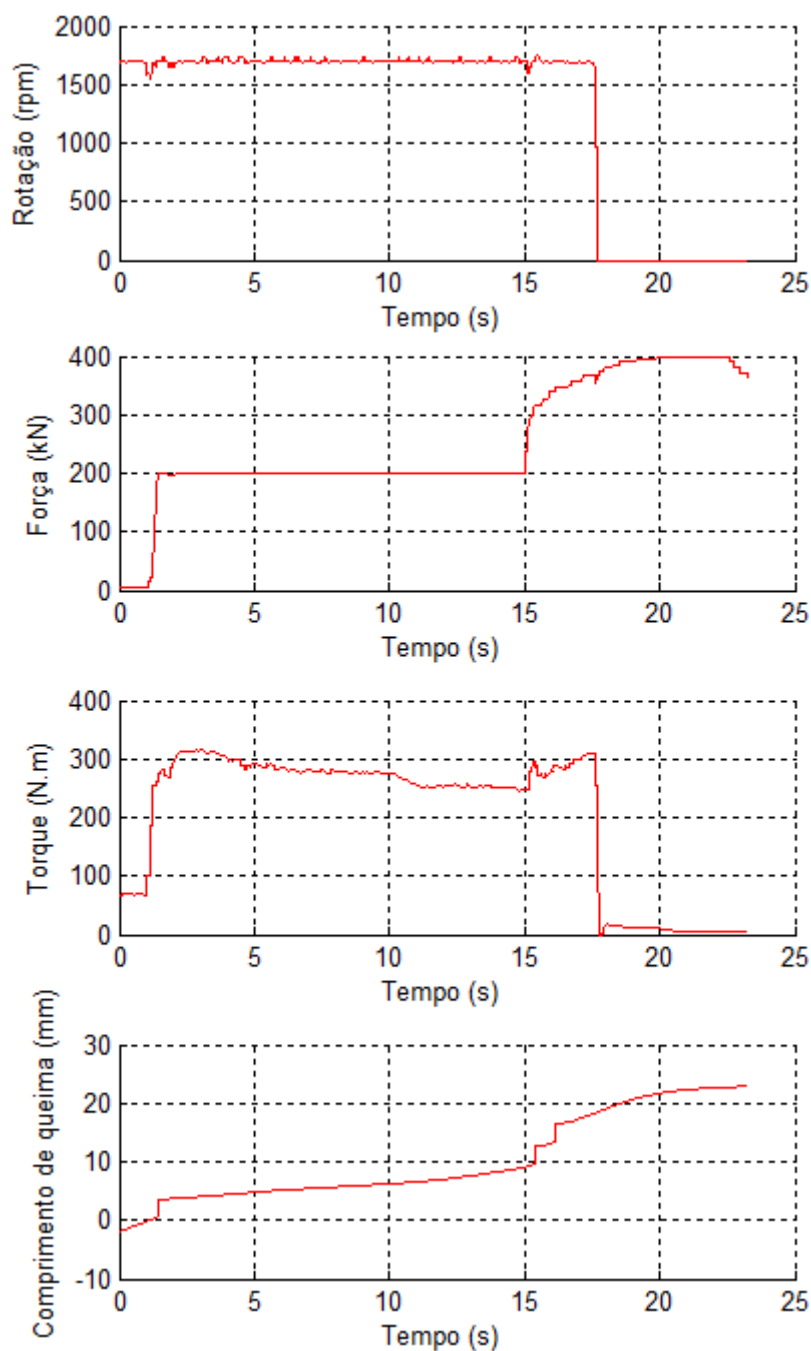


Figura 5.45 – Resultado obtido no ensaio F5: força do segundo estágio de 400 kN

No ensaio F5 (Figura 5.45), a maior oscilação de rotação também foi no início do primeiro estágio, quando houve o contato entre pino e bloco, sendo que esse foi o único momento em que o sistema antitravamento atuou.

Pode ser observado na Figura 5.45 que, mesmo a força tendo aumentado muito no segundo estágio, não houve um grande aumento no torque, já que nesse momento o material está com uma temperatura mais alta e, conseqüentemente, com menor resistência. Mesmo com a geometria “C”, que é a que possui maiores diâmetros do pino e do furo entre as geometrias utilizadas, o comprimento de queima aumentou muito rápido no segundo estágio, de tal forma que ele durou apenas 2,5 s, que foi o tempo suficiente para que a força chegasse a 367,4 kN.

Pelo resultado obtido no ensaio F5, para que a força de 400 kN pudesse ser atingida seria necessário utilizar uma geometria com diâmetros do pino e do furo maiores que os da geometria “C”. Assim, essa geometria poderia oferecer uma maior resistência, impedindo que a velocidade de avanço do cilindro chegasse a seu limite antes que a força de ensaio fosse alcançada, que foi o que aconteceu no ensaio F5. Porém, como a variação do torque foi pequena quando a força aumentou, pode-se concluir que no segundo estágio é possível realizar ensaios com a força máxima da UPPA3 sem grandes prejuízos para o controle de rotação, desde que o pino ofereça resistência suficiente para que não seja necessário um avanço muito rápido do cilindro e, conseqüentemente, um aumento muito rápido do comprimento de queima. Caso contrário, não ocorrerá o travamento, mas como aconteceu no ensaio F5, o comprimento de queima pode aumentar muito rápido fazendo com que o ensaio acabe antes que o *setpoint* de força seja atingido.

No ensaio F5, a força de 400 kN foi alcançada aproximadamente 3 s depois que a etapa de forjamento foi iniciada, e o erro obtido a partir de então foi menor que 0,3% do *setpoint*. A diferença entre o primeiro estágio dos ensaios F5 (Figura 5.45) e F1 (Figura 5.41) foi apenas a geometria utilizada, pois ambos foram realizados com força inicial de 200 kN. A geometria utilizada no ensaio F5 foi a “C”, que possui os maiores diâmetros do pino e do furo, enquanto que a utilizada no ensaio F1 foi a “A”, que possui os menores diâmetros. Apesar da diferença entre as geometrias, não houve grandes diferenças com relação ao comportamento da rotação, sendo que nos dois casos foi observada apenas uma pequena oscilação da mesma no instante do contato entre pino e bloco. Isso mostra que, para as geometrias utilizadas nesse trabalho, o comportamento do sistema de rotação não muda de forma significativa com a variação da geometria. Porém, o torque no ensaio F5 atingiu valores maiores que no ensaio F1, o que leva

a conclusão de que quanto maior o diâmetro do pino e do furo, maior é o torque necessário para a execução do reparo.

Depois de obtidos os valores máximos de força que garantem a realização completa do reparo por atrito na UPPA3, foram realizados ensaios para definir os valores mínimos de força e rotação. Na Figura 5.46 é mostrado o resultado do ensaio F6, realizado utilizando a geometria “A”, rotação de 1.000 rpm e força de 40 kN.

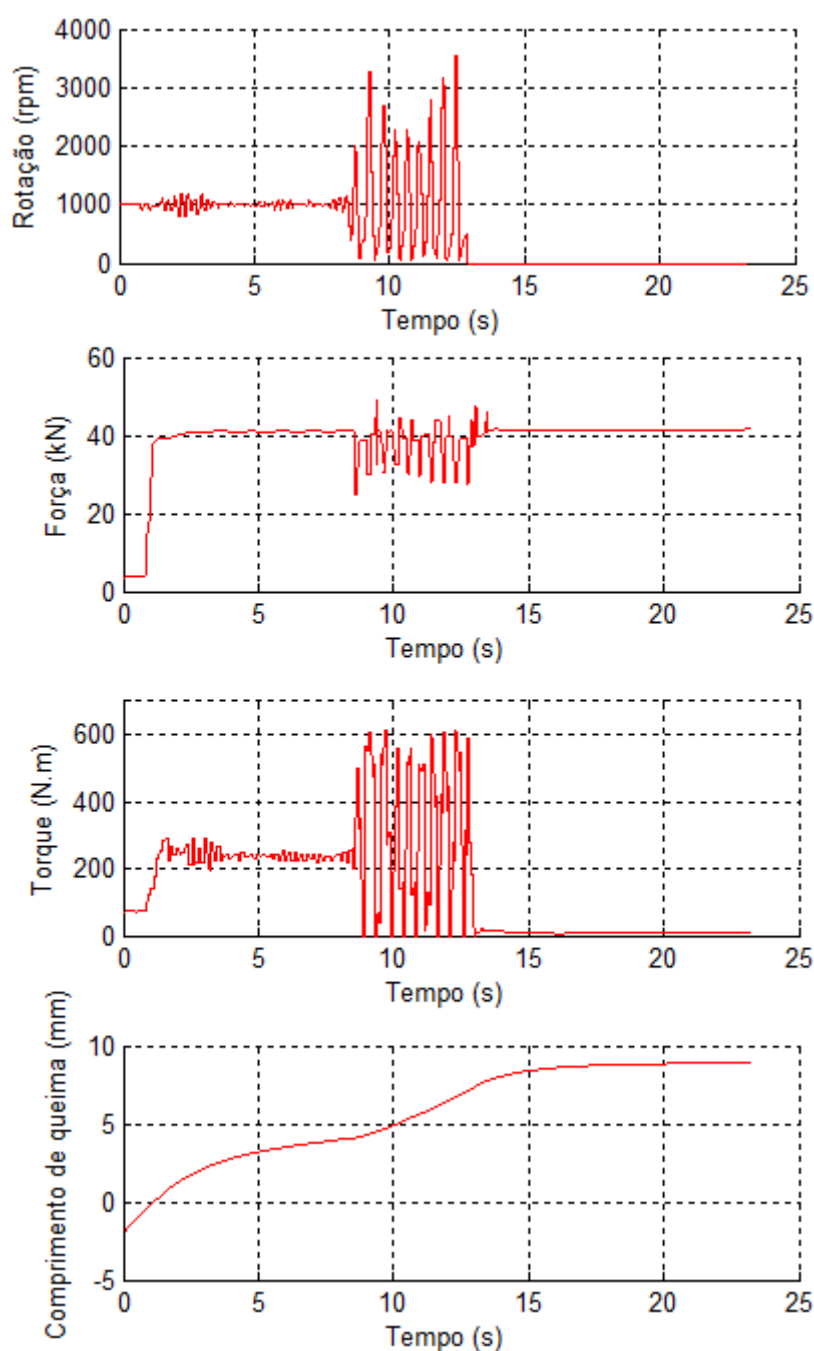


Figura 5.46 – Resultado do ensaio F6: geometria “A”, força de 40 kN e rotação de 1.000 rpm

Na realização de ensaios com rotações menores a quantidade de calor gerado pelo atrito é menor, fazendo com que o material seja processado a uma temperatura mais baixa, consequentemente aumentando sua resistência e o torque necessário para o reparo. Na Figura 5.46, pode ser observado que a UPPA3 conseguiu controlar bem o ensaio até o instante de tempo de 8,4 s, quando o comprimento de queima havia atingido 4,05 mm. Até esse momento, a amplitude de oscilação da rotação em relação ao *setpoint* havia sido inferior a 200 rpm. A força atingiu o valor estabelecido para o ensaio 0,16 s depois que houve o contato entre pino e bloco, e se manteve com um erro menor que 3% do *setpoint* até o instante de tempo de 8,4 s.

No ensaio F6, a partir do instante de tempo de 8,4 s, o sistema de rotação apresentou instabilidade, que pode ter sido resultado de uma variação muito grande do torque, a qual pode ser observada ao longo do processo de reparo na Figura 5.46. Como a quantidade do calor gerada pelo atrito é menor devido à baixa rotação, em um determinado instante o torque aumenta muito e, quando isso acontece, a rotação sofre uma redução, ativando, assim, o sistema antitravamento. Quando o sistema antitravamento é ativado, a rotação volta a aumentar, porém, quando ela aumenta, a quantidade de calor gerada também aumenta, diminuindo a resistência do material e, consequentemente, o torque. Com o torque baixo, a rotação tende a aumentar de forma muito rápida, fazendo com que mais calor seja gerado e que o torque diminua mais ainda. Porém, nesse momento a RN tenta fazer com que a rotação diminua e volte para o seu valor de *setpoint* e, quando a rotação diminui, o torque aumenta, fazendo com que ela diminua mais rápido ainda, até que ela fica abaixo do valor de *setpoint*. Nesse momento, o sistema antitravamento atua novamente e o ciclo se repete dificultando o controle de rotação.

Apesar de ter havido instabilidade na rotação no ensaio F6, como ela aconteceu quando o comprimento de queima já estava quase sendo atingido, o reparo pôde ser completado. Durante a etapa de forjamento, a força de ensaio de 40 kN foi mantida com um erro máximo de 3,5% do *setpoint*. Como a incerteza de medição de força da UPPA3 é de 13 kN, optou-se por não realizar ensaios com força menor que 40 kN, sendo que, portanto, esse valor foi definido como o limite mínimo do equipamento. O limite mínimo de rotação da UPPA3 não foi definido a partir do ensaio F6, já que houve instabilidade no controle da mesma.

Um indício de que o processo ocorreu com uma temperatura menor no ensaio F6 é o aspecto do *flash*, que é uma rebarba formada pela parte extrudada do material processado. Pode ser observado na Figura 5.47 que, comparado com resultado obtido no ensaio F4, o *flash*

do ensaio F6 apresentou um aspecto mais heterogêneo, refletindo o avanço irregular do pino durante o processamento.

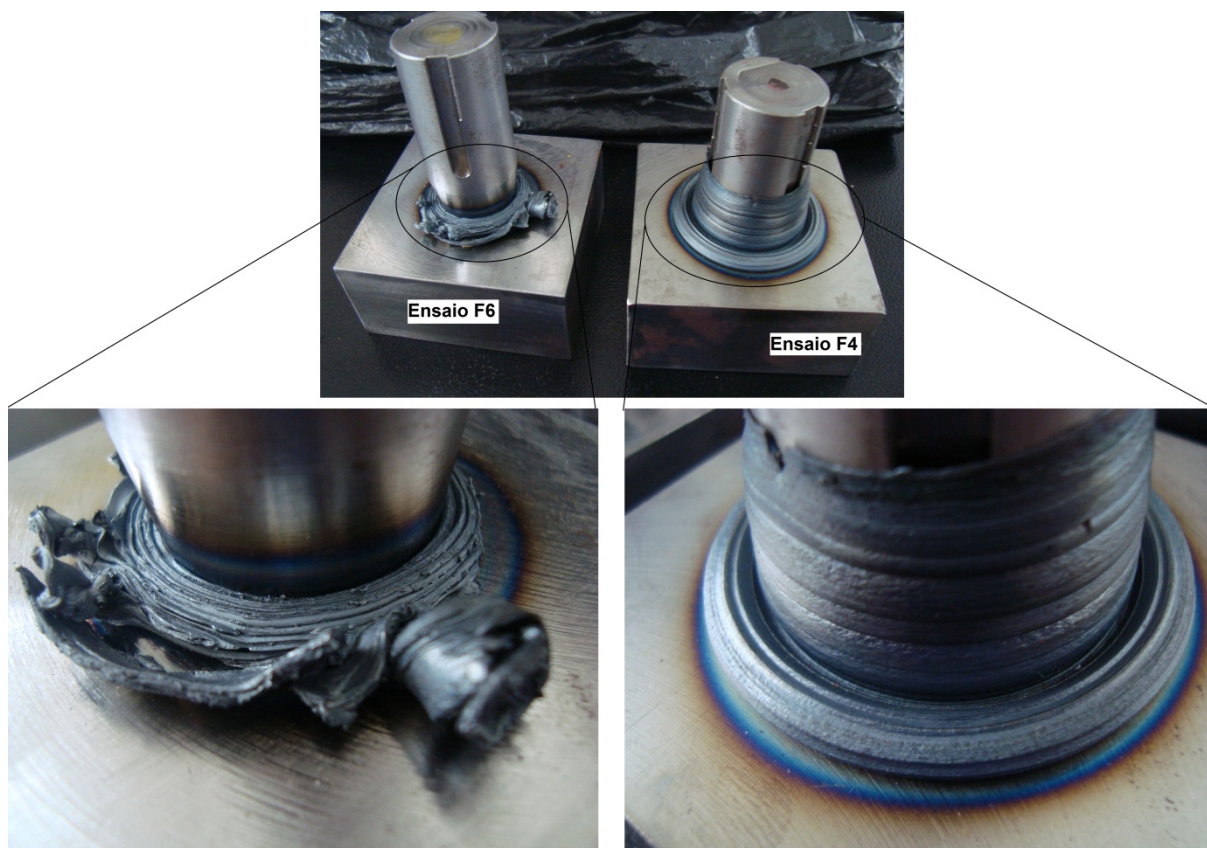


Figura 5.47 – Resultado do reparo por atrito executado nos ensaios F4 e F6

Para obter o limite mínimo de rotação da UPPA3, foi realizado o ensaio F7, com força de 50 kN, rotação de 1.200 rpm e geometria “C”. Como mencionado anteriormente, essa geometria é a que promove um maior valor de torque durante o reparo, dentre as utilizadas no desenvolvimento desse trabalho, pois o diâmetro do pino é o maior. Assim, com essa geometria buscou-se realmente uma condição mais crítica, ou seja, de torque maior.

O resultado do ensaio F7 pode ser visto na Figura 5.48, onde pode ser observado que o torque atingiu seu valor máximo, de quase 400 N.m, exatamente no instante do contato entre pino e bloco. Nesse mesmo instante, ocorreu também a maior oscilação de rotação que chegou a atingir a amplitude de 400 rpm em relação ao *setpoint*. Porém, depois desse instante a rotação foi mantida com um erro máximo de 110 rpm, equivalente a 9% do *setpoint*, ao longo de todo o primeiro estágio. Da mesma forma, depois do *overshoot* de quase 20% obtido

no instante do contato entre pino e bloco, a força foi mantida com um erro máximo de 3% do *setpoint* ao longo de todo o reparo.

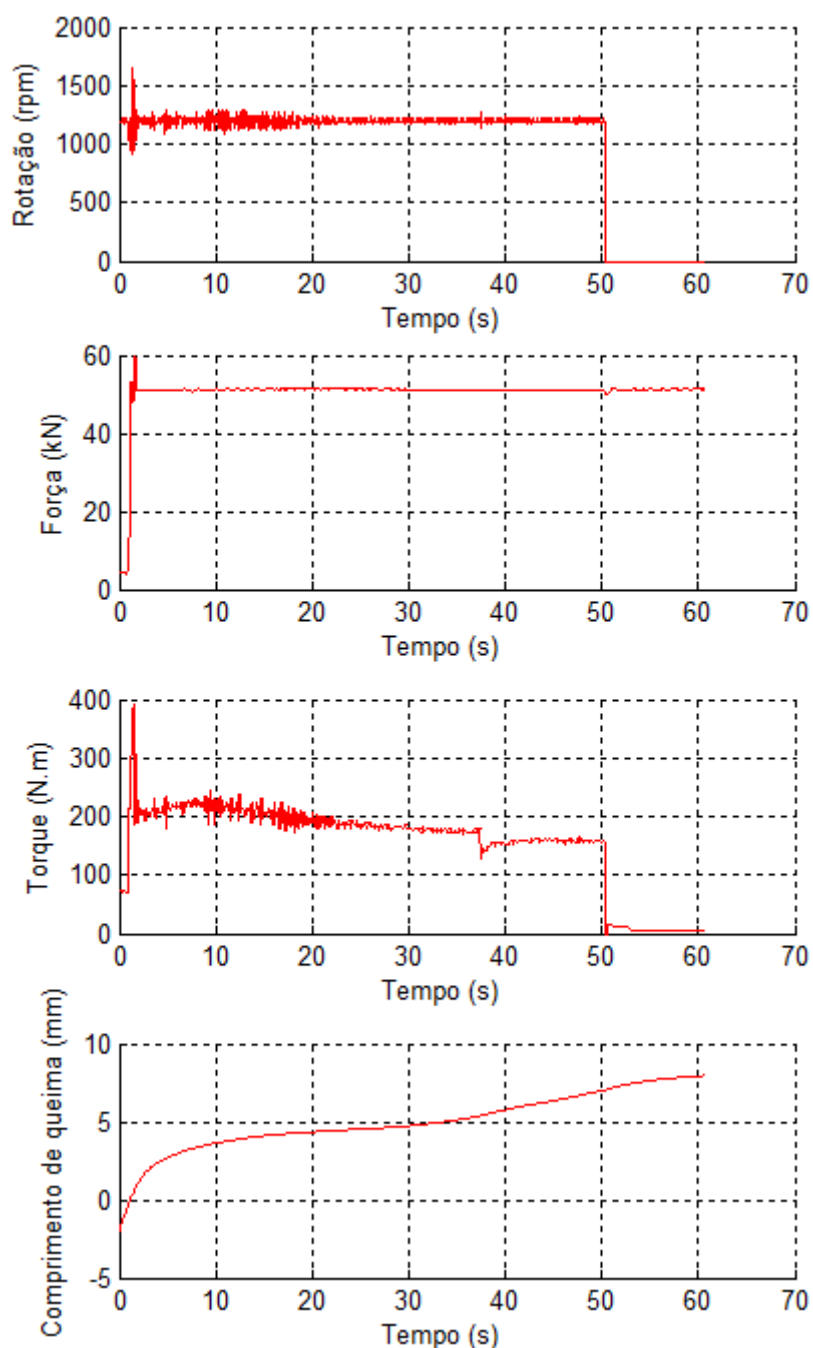


Figura 5.48 – Resultado obtido no ensaio F7: geometria “C”, força de 50 kN e rotação de 1.200 rpm

Pode ser notado na Figura 5.48 que, devido à combinação de baixa rotação e maior diâmetro do pino, o material apresentou maior resistência durante o processo de reparo, sendo

que o ensaio F7 foi, assim, o ensaio mais demorado. Comparando o primeiro estágio dos outros ensaios, o que levou mais tempo para finalizá-lo utilizando o comprimento de queima de 7 mm foi o ensaio V5 (Figura 5.39), que levou aproximadamente 25 s para isso. Já o ensaio F7 levou mais de 50 s apenas no primeiro estágio.

Como o ensaio F7 pôde ser completado sem que ocorressem grandes oscilações na rotação, o valor de 1.200 rpm foi definido como sendo o mínimo capaz de executar por completo o processo de reparo por atrito com o novo sistema de controle implementado na UPPA3.

Depois de realizados os ensaios de F1 a F7, puderam ser construídos os gráficos que mostram a nova área operacional da UPPA3 em função dos valores de força e rotação dos ensaios. Pelo que foi mostrado nos resultados dos ensaios F1 a F7, pode-se perceber que a região mais crítica de operação do equipamento está no primeiro estágio, sendo que estão nele as maiores chances de ocorrer o travamento. No ensaio F5, por exemplo, mesmo utilizando o *setpoint* máximo de força no segundo estágio do ensaio, não houve nenhum indício de que pudesse ocorrer o travamento. Já no forjamento, como não há rotação e a resistência do material aumenta devido à redução de temperatura, a força máxima pode ser atingida sem problemas.

Assim, a nova área operacional da UPPA3 foi definida apenas com base no primeiro estágio. Para o segundo estágio, com base no ensaio F5, pode ser utilizada a força máxima desde que o comprimento de queima do primeiro seja maior ou igual a 9 mm e a rotação seja de 1.700 rpm. Para o forjamento pode ser utilizado o valor máximo de força. Como a rotação do primeiro e do segundo estágio é a mesma, definindo-se a faixa operacional desse parâmetro para o primeiro estágio, automaticamente define-se a do segundo. Além disso, no segundo estágio pode ser utilizada qualquer combinação de força e rotação que esteja dentro da faixa operacional definida para o primeiro estágio. Dessa forma, foi definida a área operacional da UPPA3 em função dos valores de força e rotação do primeiro estágio para comprimentos de queima maiores e menores que 6 mm do mesmo.

Na Figura 5.49 é mostrada a faixa operacional para o primeiro estágio dos ensaios da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para um comprimento de queima menor ou igual a 6 mm. Para o sistema anterior, a faixa operacional foi definida com base no trabalho de Gontijo (2012), que conseguiu realizar ensaios com até 120 kN de força inicial para o comprimento de queima de 6 mm, conforme descrito na seção 2.2.

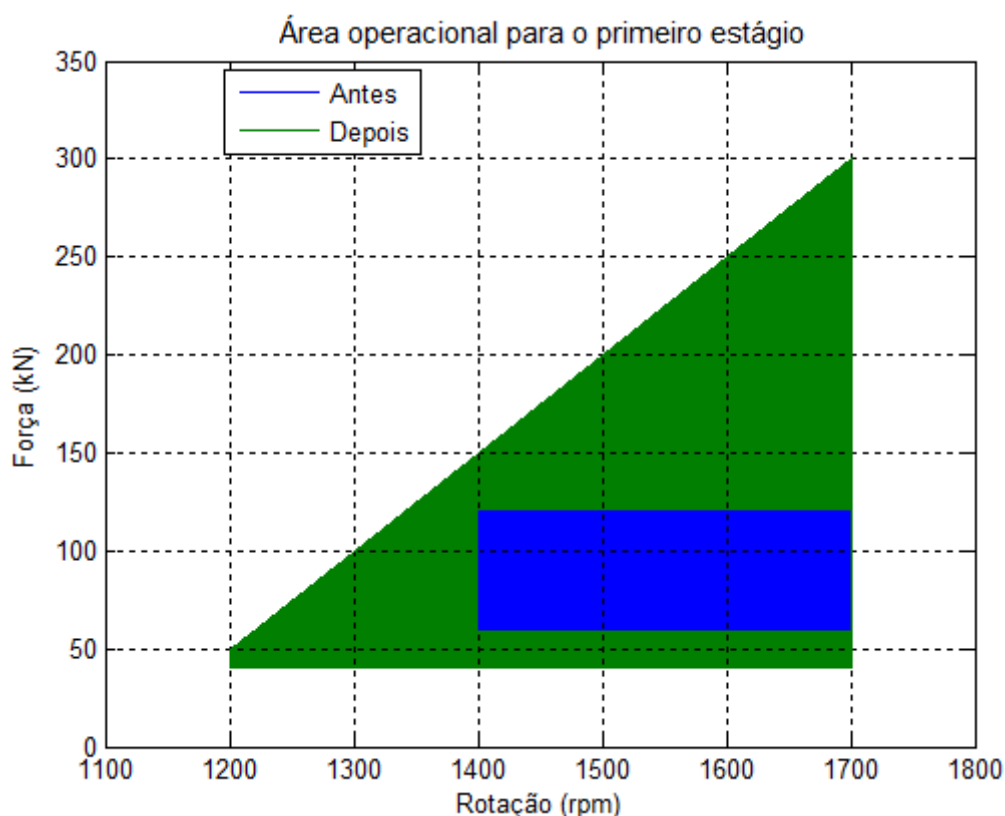


Figura 5.49 – Faixa operacional da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para um comprimento de queima menor ou igual a 6 mm

A área operacional anterior da UPPA3, mostrada no gráfico da Figura 5.49, era de 18.000 kN.rpm, enquanto que a nova área operacional é de 67.500 kN.rpm. Pode ser observado que houve um aumento considerável da faixa operacional da UPPA3 para a realização de ensaios de reparo por atrito com comprimento de queima de até 6 mm, sendo que a nova área de operação é quase quatro vezes maior que a anterior.

Porém, comprimentos de queima de até 6 mm não são comumente utilizados nos ensaios de reparo por atrito da UPPA3. O mais comum é a utilização de comprimentos de queima maiores que esse para que se possa obter maior garantia de preenchimento completo do furo ao fim do reparo. Assim, a faixa operacional mais importante a ser definida é aquela cujo comprimento de queima utilizado pode ser maior que 6 mm. Além disso, dentro da faixa operacional para comprimentos de queima maiores que 6 mm também podem ser realizados ensaios com valores menores ou iguais a esse.

Na Figura 5.50 é mostrada a faixa operacional da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para qualquer valor de comprimento de queima. Para o sistema anterior, a faixa operacional foi definida com base nos trabalhos de Borges

(2011) e Moura (2011), conforme descrito na seção 2.2. Apesar de nesses dois trabalhos ter sido possível realizar apenas um ensaio com força inicial de 100 kN e rotação de 1.700 rpm, sendo que todos os outros obtiveram travamento, foi considerado que esse valor de força era o limite máximo do equipamento. Já depois da implementação do novo sistema de controle, o limite de força foi considerado de 250 kN, pois com esse valor não houve nenhum indício de travamento.

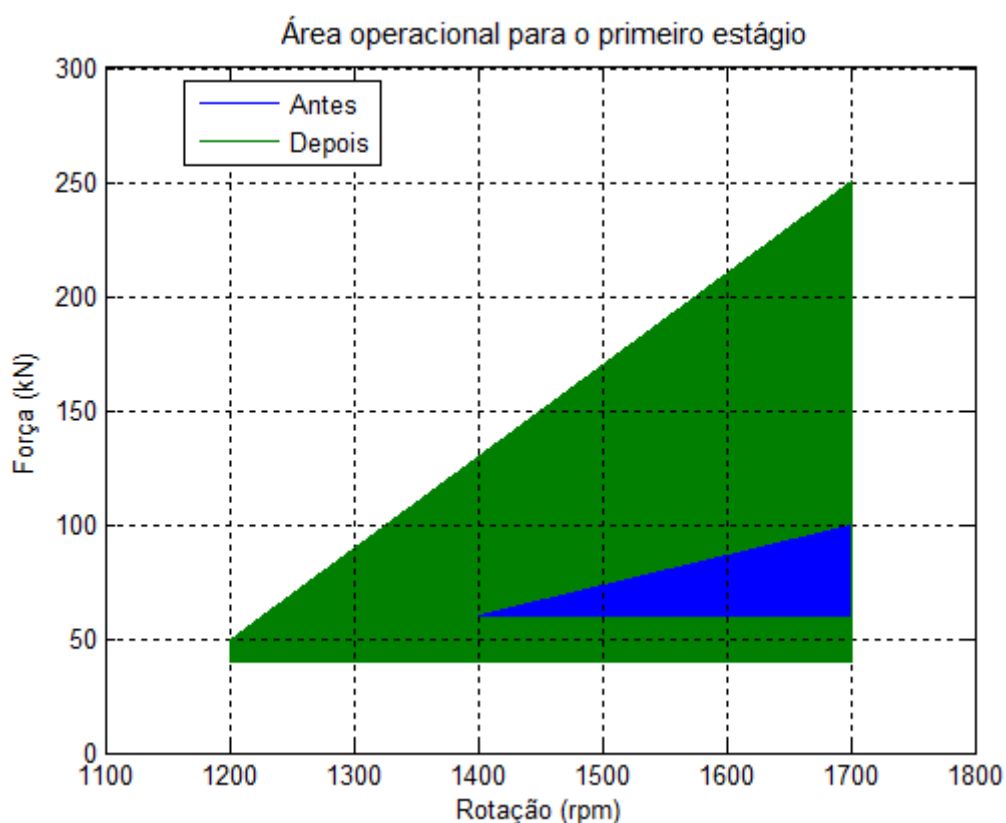


Figura 5.50 – Faixa operacional da UPPA3 antes e depois de implementado o novo sistema de controle para qualquer valor de comprimento de queima

A área operacional anterior da UPPA3, mostrada no gráfico da Figura 5.50, era de 6.000 kN.rpm, enquanto que a nova área operacional é de 55.000 kN.rpm. Pode ser observado que houve um aumento considerável da faixa operacional da UPPA3 para a realização de ensaios de reparo por atrito, sendo que a nova área de operação é quase dez vezes maior que a anterior.

CAPÍTULO VI

Conclusão

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas ao fim do desenvolvimento deste trabalho:

- a) Levando em consideração não apenas o seu desempenho, mas também a dificuldade enfrentada pelo AG no seu ajuste, a rede neural de um neurônio com função de ativação linear se mostrou a melhor opção entre todas as RNs testadas no controle de rotação da UPPA3;
- b) Comparada com o controlador PID, a rede neural de um neurônio e função de ativação linear se mostrou muito mais eficaz no controle rotação da UPPA3, mostrando-se mais preparada para as grandes variações de torque que ocorrem no processo de reparo por atrito;
- c) A identificação das plantas dos sistemas de força e rotação não obteve sucesso, principalmente no sistema de rotação, por causa da baixa frequência de amostragem que foi utilizada nos experimentos, a qual é limitada pela capacidade do sistema de aquisição da UPPA3;
- d) O sistema antitravamento desenvolvido se mostrou muito eficaz ao impedir o travamento do sistema de rotação da UPPA3 durante os ensaios de reparo por atrito;
- e) A implementação da rampa de fechamento da válvula do sistema de rotação não obteve sucesso ao tentar fazer com que o motor hidráulico reduzisse sua rotação mais lentamente ao fim do reparo por atrito, pois o torque gerado pelo próprio processo faz com que a redução de rotação seja bem mais rápida;

- f) A rápida despressurização da linha ao fim do processo de reparo por atrito possibilitou a redução dos golpes de aríete no sistema hidráulico de rotação da UPPA3;
- g) O novo sistema de controle de força e rotação implementado na UPPA3, depois de ajustado, se mostrou mais eficaz que o anterior, apresentando uma velocidade de resposta bem maior e erros bem menores no controle dos parâmetros;
- h) A velocidade de resposta do sistema de controle está diretamente relacionada com seu desempenho e com a faixa operacional da UPPA3, já que a velocidade de resposta maior do novo sistema de controle promoveu uma grande ampliação da faixa operacional do equipamento;
- i) A maior velocidade de resposta do sistema de controle de força permitiu que forças maiores que 250 kN pudessem ser aplicadas no segundo estágio do processo de reparo por atrito, o que não era possível com o sistema de controle anterior;
- j) Através da metodologia desenvolvida nesse trabalho, o novo sistema de controle da UPPA3 foi capaz de cobrir uma faixa operacional quase dez vezes maior que a anterior, promovendo uma expansão considerável dos limites de força e rotação que garantem a execução completa dos ensaios de reparo por atrito nesse equipamento.

CAPÍTULO VII

Trabalhos Futuros

Para dar continuidade a esse trabalho e buscar o melhor desempenho no controle de força e rotação de unidades de reparo por atrito ou de qualquer outro tipo de sistema que possua características similares às da UPPA3, são feitas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Fazer um estudo mais aprofundado da faixa operacional da UPPA3 para o segundo estágio, já que ela depende não só dos valores de força e rotação, mas também do valor de comprimento de queima do primeiro estágio;
- b) Aplicar a mesma metodologia desenvolvida nesse trabalho, porém utilizando atuadores (válvulas) e sistemas de medição com maior velocidade de resposta (até mesmo sensores de pressão dinâmicos, por exemplo) e sistemas de controle com maior velocidade de processamento, já que isso influi diretamente no desempenho e também na faixa operacional do equipamento. Como a variação de torque no processo de reparo por atrito é muito rápida, é essencial a presença de um sistema de controle com alta velocidade de resposta, sendo que quanto mais alta, mais rápido o controlador irá atuar, promovendo menores oscilações e, conseqüentemente, menores serão as chances de instabilidade e travamento;
- c) Utilizar modelos *fuzzy* diferentes na função de avaliação do AG, com outras funções de pertinência, ou mesmo utilizar modelos como os de Mamdani e Takagi-Sugeno-Kang, buscando melhores ferramentas para a seleção dos indivíduos durante o ajuste dos controladores;
- d) Utilizar não só a integral do erro absoluto, o *overshoot* e o *settling time* na avaliação dos indivíduos durante o ajuste dos controladores pelo AG, mas

também outros parâmetros importantes, como o tempo de subida, o erro em regime permanente e a oscilação do sistema controlado;

- e) Sugere-se também utilizar, no ajuste dos controladores, um AG que se auto-organiza, ou seja, que o tamanho da população e o número de filhos e mutações sejam alterados automaticamente de acordo com as melhoras obtidas em cada geração. Como o ajuste utilizando o sistema real possui limitações com relação ao número de gerações do AG, devido ao tempo necessário para cada uma, esse método pode promover um ajuste mais rápido sem que haja convergência prematura;
- f) Utilizar um AG associado a um método determinístico na busca do melhor ajuste para o controlador. Assim, poder-se-á associar as vantagens desses dois métodos. No caso do AG, a vantagem é a sua maior capacidade de encontrar o ótimo global. Já o método determinístico, possui a vantagem de maior velocidade de ajuste, já que com ele há a necessidade de um número bem menor de testes na planta para encontrar o ótimo local;
- g) Utilizar controladores adaptativos, ou seja, que se auto ajustam à medida que vão sendo realizados os ensaios. Uma dificuldade no reparo por atrito é que a geometria e os parâmetros de ensaio são alterados constantemente, sendo que isso influi diretamente no comportamento do sistema. Além disso, como pôde ser visto no desenvolvimento deste trabalho, até mesmo o comprimento de queima tem influência nesse comportamento. Utilizando um método de controle adaptativo, quando uma geometria for alterada, por exemplo, pode ser que nos primeiros ensaios não se obtenha um controle muito bom, porém, à medida que eles vão sendo realizados, o controlador vai se adaptando cada vez mais àquele novo tipo de geometria, melhorando cada vez mais o controle;
- h) Associar o controle adaptativo a um banco de dados que permita ao sistema de controle conhecer os limites operacionais e a configuração dos controladores para cada tipo de geometria. Assim, a configuração dos controladores não é perdida a cada vez que se altera a geometria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREWS, R.E.; MITCHELL, S.J. Underwater Repair by Friction Stitch Welding. **Metals and Materials**. v. 6, n. 12, p. 796-797, dez. 1990.

ASTROM, Karl J.; HAGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. Instrument Society of America: Research Triangle Park, 1995. 343 p.

BARRETO, J. M. Introdução às Redes Neurais Artificiais. In: V ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA, 1997, Santa Maria, Florianópolis, Maringá. **Anais...**, p. 41-71.

BLAKEMORE, G. R. Friction Stud Welding in Hazardous Areas. **Welding & Metal Fabrication**. v. 61, n. 9, p. 428-430, nov. 1993.

BLAKEMORE, G. R.. Friction Welding on Live Pipelines. In: INTERNATIONAL PIPELINE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2., 1995, Ostend. **Proceedings...**, p. 559-569.

BLAKEMORE, G. R.. Friction Welding - Technology for the New Millennium. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 31., 1999, Houston. **Proceedings...**, p. 851-860.

BOLTON, William. **Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Books, 1995. 497 p. Tradução: Valceres Vieira Rocha e Silva.

BORGES, B. M. **Instrumentação, Controle e Operacionalização de uma Unidade de Reparo por Atrito com Capacidade de Carga Axial de 500 kN**. 2011. 97 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BOSCH REXROTH AG. **Válvulas Servossolenóides com Eletrônica Integrada (OBE) Tipo 4WRPEH 6**. Lohr am Main: Bosch Rexroth AG, 2003. 12 p.

BOSCH REXROTH AG. **Válvulas Servossolenóides com Sobreposição Positiva e Eletrônica Integrada**. Lohr am Main: Bosch Rexroth AG, 2005. 22 p.

BROWN, M.; HARRIS, C. **Neurofuzzy adaptive modelling and control**. New York: Prentice Hall, 1994. 508 p.

CAIXETA, L. A. **Otimização de Parâmetros de Processamento de Pinos por Atrito em Unidade com Capacidade de 245 KN**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

CAMPESTRINI, Lucíola. **Sintonia de controladores PID descentralizados baseada no método do ponto crítico**. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHE, X.; LUO, Y.; CHEN, Z. Optimization for PID Control Parameters on Hydraulic Servo Control System Based on the Elite Multi-parent Crossover Evolutionary Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MECHATRONICS AUTOMATION, 2010, Changsha City. **Proceedings...**, p. 845-848.

DELANY, F.; LUCAS, W; THOMAS, W.; HOWSE, D.; ABSON, D. MULLIGAN, S.; BIRD, C. Advanced Joining Processes for Repair in Nuclear Power Plants. In: INTERNATIONAL FORUM ON WELDING TECHNOLOGIES IN ENERGY ENGINEERING, 2005, Shanghai. **Proceedings...**, p. 54-69.

DRAPER, Norman Richard; SMITH, Harry. **Applied Regression Analysis**. 2. ed. New York: Wiley, 1981. 709 p.

ELLIS, C. R. G. Continuous Drive Friction Welding of Mild Steel. **Welding Journal**. p 183s-197s, abr. 1972.

FORMOSO, C. M., **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Instrumentação e Controle para uma Unidade de Processamento de Pinos por Atrito Portátil**. 2012. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FREITAS, D. S. **Sintonia de Controladores PID para Controle de Força e Velocidade em um Tribômetro de Grandes Dimensões**. 2011. 134 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GEN, Mitsuo; CHENG, Runwei. **Genetic Algorithms and Engineering Optimization**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 495 p.

GOLDBERG, David Edward. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1989. 421 p.

GONTIJO, M. F. **O Efeito da Espessura da Chapa sobre a Qualidade do Reparo por Atrito**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

HAYKIN, Simon. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. 2. ed. Singapore: Pearson Education, Inc., 1999. 823 p.

HEBB, Donald O. **The Organization of Behavior**. New York: Wiley, 1949. 335 p.

HOLLAND, John H.. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: an Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence**. Ann Arbor: University Of Michigan Press, 1975. 183 p.

HUNT, K.J.; SBARBARO, D.; ZBIKOWSKI, R; GAWTHROP, P.J. Neural Networks for Control Systems - A Survey. **Automatica**. Great Britain, v. 28, n. 6, p. 1083-1112. maio 1992.

HWANG, H. F. **Desenvolvimento, Projeto, Construção e Teste de um Cilindro de Reparo por Atrito Portátil**. 2010. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

JAEN-CUELLAR, Arturo Y; ROMERO-TRONCOSO, Rene de J.; MORALES-VELAZQUEZ, Luis; OSORNIO-RIOS, Roque A. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems. **International Journal Of Advanced Robotic Systems**. v. 10, p. 1-14. maio 2013.

JINHUA, ZHANG; JIAN, ZHUANG; HAIFENG ,DU; SUN'AN, WANG. Self-organizing Genetic Algorithm Based Tuning of PID Controllers. **Information Sciences**. v. 179, n. 7, p. 1007-1018. mar. 2009.

KOHAGURA, Tiago. **Lógica Fuzzy e suas Aplicações**. 2007. 61 f. Projeto de Fim de Curso – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

KUMAR, Naveen; PANWAR, Vikas; BORM, Jin-Hwan; CHAI, Jangbom; YOON, Jungwon. Adaptive neural controller for space robot system with an attitude controlled base. **Neural Computing And Applications**. London, v. 23, p. 2333-2340. dez. 2013.

LAGARIAS, J.C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. E. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. **SIAM Journal of Optimization**. v. 9, n. 1, p. 112-147. dez. 1998.

LJUNG, Lennart. **System Identification - Theory for the User**. 2. ed. New Jersey: Prentice-hall Ptr, 1999. 609 p.

LOTSBERG, I.; LANDET, E. Fatigue Capacity of Side Longitudinals in Floating Structures. **Marine Structures**. v. 18, n. 1, p. 25-42. jan. 2005.

MALUTTA, César. **Método de apoio à Tomada de Decisão sobre a Adequação de Aterros Sanitários utilizando a Lógica Fuzzy**. 2004. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. **Bulletin Of Mathematical Biophysics**. v. 5, p. 115-133. 1943.

MCNEILL, Martin F.; THRO, Ellen. **Fuzzy Logic: A Practical Approach**. Chestnut Hill: Academic Press, Inc., 1994. 292 p.

MEYER, A.; ROOS, A.; SANTOS, J. F.; GIBSON D.; BLAKEMORE G.; HAMMERIN R. Subsea Robotic Friction-Welding-Repair System. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2001, Houston. **Proceedings...**, p. 617-626.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing - Bonding Mechanism and Properties**. 2003. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica e Elétrica, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

MINERALS MANAGEMENT SERVICE. United States Department of the Interior Minerals Management Service. **Assessment of Deep Water Pipeline Repair in the Gulf of Mexico**. Metairie, Louisiana: Project Consulting Services, Inc. 2000.

MOURA, R. F. **Estudo da Energia Dissipada em Ensaios de Reparo por Atrito**. 2011. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NAHAPETIAN, N.; MOTLAGH, M.R. JAHED; ANALOUI, M. PID Gain Tuning using Genetic Algorithms and Fuzzy Logic For Robot Manipulator Control. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER CONTROL, 2008, Phuket. **Proceedings...**, p. 346-350.

NICHOLAS, E. D. Underwater Friction Welding for Electrical Coupling of Sacrificial Anodes. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 16., 1984, Houston. **Proceedings...** . p. 271-276.

NICULA, Matheus Tabaldi. **Estudo, Análise e Simulação das Técnicas de Sintonia de Controladores PID mais Empregadas Atualmente em Plantas Industriais**. 2010. 120 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

OGATA, Katsuhiko. **Modern Control Engineering**. 4. ed. New Jersey: Prentice-hall, Inc., 2002. 964 p.

PINHEIRO, G. A.; BRACARENSE, A. Q.; MARQUES, P. V.; MEYER, A.; DOS SANTOS, J.F.; BLAKEMORE, G. R. Costura Por Fricção: Fundamentos e Aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 1., 2001, Curitiba. **Proceedings...**, p. 1-7.

PIRES, R. R. **Efeitos da Geometria, da Força Axial e da Rotação no Reparo por Atrito**. 2007. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RAO, Singiresu S.. **Engineering Optimization: Theory and Practice**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 813 p.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes – Fundamentos e Aplicações**. Barueri: Editora Manole, 2005. 525 p.

RODRIGUES, Bruno Castro. **Controle da Atitude de um Satélite utilizando uma Roda de Reação e Controlador PID**. 2011. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ROSENBLATT, F. The Perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**. v. 65, p. 386-408. nov. 1958.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning internal representations by error propagation. In: RUMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L. **Parallel Data Processing**. Cambridge, MA: The M.I.T. Press, 1986. p. 318-362.

SALAMA, M. M.; LOTSBERG, I. Fatigue Performance of Repaired FPSO Details using Stitch Friction Welding Process. In: OMAE SPECIALITY SYMPOSIUM ON FPSO INTEGRITY, 2004, Houston. **Proceedings...**, p. 1-9.

SCHNITMAN, Leizer. **Controladores Preditivos Baseados em Redes Neurais Artificiais**. 1998. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SEYEDKAZAEMI, M.; AKBARIMAJD, A.; RAHNAMAEI, A.; BAGHBANPOURASL, A. A Genetically Tuned Optimal PID Controller. In: WSEAS INT. CONF. ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, KNOWLEDGE ENGINEERING AND DATA BASES, 6., 2007, Corfu Island. **Proceedings...**, p. 229-233.

SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: E. Blücher, 1999. 165 p.

SIEMENS AG. **SIMATIC S7-200 Programmable Controller System Manual**. 8. ed. Nuernberg: Siemens AG, 2008. 535 p.

SOUZA, R. J. **Desenvolvimento, Projeto, Construção e Validação de um Equipamento de Reparo de Trincas por Atrito**. 2006. 101 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TEBBETT, I.E.; FORSYTH, P.; CHISHOLM, S. Low Cost Jacket Repairs Using New Shear Connection Techniques. In: INTERNATIONAL OFFSHORE INSPECTION REPAIR AND MAINTENANCE CONFERENCE, 1988, Aberdeen. **Proceedings...**, p. 1-21.

WIDROW, B.; HOFF, M. E.. Adaptive switching circuits. In: IRE WESCON CONVENTION RECORD, 1960, New York. **Proceedings...**, p. 96-104.