

**ROBSON PACÍFICO GUIMARÃES LIMA**

**UMA APLICAÇÃO BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS  
PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO  
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleonilson  
Protásio de Souza

**JOÃO PESSOA**

**2013**

**ROBSON PACÍFICO GUIMARAES LIMA**

**UMA APLICAÇÃO BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS  
PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO  
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleonilson  
Protásio de Souza

**JOÃO PESSOA**

**2013**

## FICHA CATALOGRÁFICA

L732u Lima, Robson Pacífico Guimarães.

Uma aplicação baseada em sistemas imunológicos artificiais para detecção de falhas em uma plataforma de abastecimento / Robson Pacífico Guimarães Lima - João Pessoa, 2013.

117f.

Orientador: Cleonilson Protásio de Souza

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CEAR

1. Engenharia elétrica. 2. Algoritmo de seleção negativa.  
3. Detecção de falhas. 4. Controlador Fuzzy.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**UMA APLICAÇÃO BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS  
PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO  
DE ÁGUA**

Elaborada por

**ROBSON PACÍFICO GUIMARÃES LIMA**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica.**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

**PROF. DR. CLEONILSON PROTÁSIO DE SOUZA (Presidente, ORIENTADOR)**

**PROF. DR. JUAN MOISÉS MAURÍCIO VILLANUEVA**

**PROF. DR SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA**

**PROF. DR. IGUATEMI EDUARDO DA FONSECA**

João Pessoa/PB, 30 de agosto de 2013.

Aos meus pais, Severino Guimarães Lima e Izaura Pacífico Guimarães, ao meu irmão Rogério Pacífico Guimarães Lima, a Sílvia Roberta, a Robson Hugo (bem vindo ao mundo) e ao meu orientador Cleonilson Protásio de Souza.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, por me conduzir até hoje em todos os caminhos da minha vida. Aos meus pais, verdadeiros mestres na arte de educar para que eu sempre seja um cidadão consciente e justo na verdade.

Ao professor Cleonilson Protásio de Souza pela orientação e empenho durante as fases da pesquisa.

Ao Prof. Heber Pimentel Gomes por disponibilizar a pesquisa como fruto do LENHS (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB), laboratório que coordena com empreendedorismo e competência.

Aos meus amigos, em especial Bruno Willian e Verônica Maria, e demais colegas da pós-graduação que colaboraram de maneira direta e/ou indireta com o meu trabalho.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”

Friedrich Nietzsche.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS, TABELAS E GRÁFICOS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
1.2 MOTIVAÇÃO.....	21
1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA.....	21
<b>2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA</b> .....	<b>23</b>
2.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO .....	23
2.1.1 RECONHECIMENTO DOS AGENTES PATOGÊNICOS.....	25
2.1.2 MATURAÇÃO DA AFINIDADE .....	26
2.1.3 TOLERÂNCIA AO PRÓPRIO.....	28
2.2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA.....	30
2.3 CRITÉRIOS DE CASAMENTO PARCIAL.....	32
2.3.1 CRITÉRIO DE CASAMENTO R-CONTÍNUOS .....	32
2.3.2 CRITÉRIO DE CASAMENTO R-HAMMING.....	33
2.3.3 CRITÉRIO DE CASAMENTO PARA CASOS COM VETORES REAIS .....	33
2.4 PROBABILIDADE DE ERRO DE DETECÇÃO .....	35
2.5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA.....	37
2.6 ESTUDOS RELACIONADOS.....	38
<b>3 LÓGICA FUZZY</b> .....	<b>41</b>
3.1 LÓGICA FUZZY .....	41
3.1.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	43
3.1.2 FUZZIFICAÇÃO .....	44
3.1.3 BASE DE REGRAS.....	45
3.1.4 DEFUZZIFICAÇÃO .....	46
3.2 CONTROLE DE PROCESSO FUZZY.....	46
3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY.....	47
<b>4 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA EM UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA QUE UTILIZA CONTROLE FUZZY</b> .....	<b>52</b>
4.1 FALHAS EM ATUADORES.....	53

4.2	PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO CONTROLADORES BASEADOS NA LÓGICA FUZZY .....	53
4.2.1	DESCRIÇÃO DA PLANTA UTILIZADA .....	54
4.2.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS .....	60
4.2.3	CONTROLADORES FUZZY .....	60
4.3	EXPERIMENTOS REALIZADOS .....	64
4.3.1	EXPERIMENTO 01: Sistema com Variação de Demanda com Atuação do Controlador Fuzzy .....	65
4.3.2	Características de desempenho do sistema submetido a perturbações. ....	66
4.4	PROCEDIMENTOS PARA O TESTE DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA .....	67
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>71</b>
5.1	SIMULAÇÕES REALIZADAS.....	71
5.2	COBERTURA DE FALHAS.....	78
5.3	TEMPO DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL.....	79
5.4	MONITORAMENTO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	86
5.4.1	TESTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS .....	88
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS PUBLICADOS .....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS, TABELAS E GRÁFICOS

FIGURA 2.1 - CAMADAS DE DEFESA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO. FONTE: (AMARAL, 2006). .....	24
FIGURA 2.2 - UNIÃO ENTRE RECEPTORES E EPÍTOPOS. FONTE: (AMARAL, 2006). .....	26
FIGURA 2.3 - MECANISMO DE MATUREZAÇÃO DE AFINIDADE ENTRE AS CÉLULAS TIPO B. FONTE: (AMARAL, 2006). .....	27
FIGURA 2.4 - MECANISMO DE MATUREZAÇÃO DAS CÉLULAS T. FONTE: (AMARAL, 2006). .....	29
FIGURA 2.5 - PROCESSO DE CO-ESTIMULAÇÃO. FONTE: (AMARAL, 2006). ..	29
FIGURA 2.6 - FASE DE GERAÇÃO DE DETECTORES SEGUNDO O ASN. ....	31
FIGURA 2.7 - FASE DE MONITORAMENTO SEGUNDO O ASN .....	31
FIGURA 2.8 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-CONTINUOS. OS VETORES A E B CASAM PARA $R \leq 5$ .....	33
FIGURA 2.9 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-HAMMING. OS VETORES A E B CASAM PARA $R \leq 9$ .....	33
FIGURA 2.10 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL (COM VETORES REAIS) ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-HAMMING. OS VETORES A E B CASAM PARA $R \leq 5$ .....	34
FIGURA 2.11 - RELAÇÃO ENTRE ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM O PARÂMETRO R. OS VETORES PRÓPRIOS SÃO REPRESENTADOS POR $\square$ , DETECTORES POR X, ESPAÇOS DE DETECÇÃO POR $\circ$ . (A) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM PARÂMETRO R ADEQUADO, MAS, COM OCORRÊNCIA DE SOBREPOSIÇÃO. (B) SEM OCORRÊNCIA DE SOBREPOSIÇÃO. (C) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM ( $R \rightarrow 1$ ). (D) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM ( $R \rightarrow 1$ ). FONTE: (SOUZA, 2005) .....	35
FIGURA 3.1 - CONJUNTO IDADE NAS ABORDAGENS BOOLEANA (A) E FUZZY (B). FONTE: (CAMBOIM, 2012). .....	42
FIGURA 3.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLADOR FUZZY. FONTE: (CAMBOIM, 2012). .....	43
FIGURA 3.3 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLADOR FUZZY. FONTE: (CAMBOIM, 2012). .....	44
FIGURA 3.4 - ESQUEMA DO RACIOCÍNIO FUZZY .....	47
FIGURA 3.5 – DETERMINAÇÃO DO PROCESSO DE DEFUZZIFICAÇÃO BASEADA NAS REGRAS ATIVAS. ....	49
FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA DE CONTROLE. ....	52
FIGURA 4.2 - BANCADA EXPERIMENTAL. FONTE: (CAMBOIM, 2012). ....	54
FIGURA 4.3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA BANCADA. FONTE: (CAMBOIM, 2012). .....	56
FIGURA 4.4 - CONJUNTO MOTOR-BOMBA FONTE: (CAMBOIM, 2012). ....	56

<b>FIGURA 4.5 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 4.6 - MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 4.7 - MEDIDOR DE PRESSÃO. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>58</b>
<b>FIGURA 4.8 - VÁLVULA DE CONTROLE PROPORCIONAL. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 4.9 - INTERFACE DE AQUISIÇÃO DE DADOS. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 4.10 - CURVA DE DEMANDA DO SISTEMA COM COMBINAÇÃO DE ATUAÇÃO DOS CONTROLADORES. FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 4.11 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY PRINCIPAL FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 4.12 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY SECUNDÁRIO FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 4.13 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY ACIONAMENTO FONTE: (CAMBOIM, 2012).</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.14 - CURVA DE PRESSÃO EM SITUAÇÃO DE FUNCIONAMENTO NORMAL DO SISTEMA</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 4.15 - CURVA DE PRESSÃO ACRESCIDA DE ANORMALIDADES</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.16 - CURVA DE FUNCIONAMENTO NORMAL DO SISTEMA (PRESSÃO)</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 4.17 - CURVA DE PRESSÃO COM INTERVALOS DE FALHAS FIGURA</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 5.1 - FASE DE GERAÇÃO DE DETECTORES (FASE 1) PARA O ASN IMPLEMENTADO.</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 5.2 - FASE DE MONITORAMENTO (FASE 2) PARA O ALGORITMO IMPLEMENTADO.</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 5.3 - DETECÇÃO DE FALSOS POSITIVOS (R-HAMMING)</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 5.4 - DETECÇÃO DE FALSOS POSITIVOS (R-CONTÍNUOS)</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 5.5 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS NOS INTERVALOS COM ANORMALIDADES (R-HAMMING).</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 5.6 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS NOS INTERVALOS COM ANORMALIDADES (R-CONTÍNUOS).</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 5.7 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS COM PONTOS DE ANORMALIDADES (R-HAMMING).</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 5.8 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS COM PONTOS DE ANORMALIDADES (R-CONTÍNUOS).</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 5.9 - INTERFACE DESENVOLVIDA NO AMBIENTE LABVIEW</b>	<b>87</b>
<b>FIGURA 5.10 - CURVA DE PRESSÃO NORMAL ACRESCIDA DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS.</b>	<b>89</b>
<b>FIGURA 5.11 - CURVAS DE PRESSÃO ACRESCIDA DE FALHAS E DERIVADA DE PRESSÃO.</b>	<b>91</b>
<b>FIGURA 5.12 - CURVA DE DERIVADA DE PRESSÃO ACRESCIDA DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS.</b>	<b>91</b>

<b>FIGURA 5.13 - CURVA DE PRESSÕES E DERIVADAS DE PRESSÃO NORMAIS ACRESCIDAS DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS (CONCATENAMENTO).</b>	<b>95</b>
<b>FIGURA 5.14 - CURVA DE PRESSÕES E DERIVADAS DE PRESSÃO NORMAIS ACRESCIDAS DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS (INTERVALAMENTO).</b>	<b>97</b>
<b>TABELA 3. 1 - VETORES FUZZY BASEADOS EM VARIÁVEIS DE ENTRADA</b>	<b>45</b>
<b>TABELA 5. 1 - PORCENTAGEM DE COBERTURA DE FALHAS E PROBABILIDADE DE ERRO DE DETECÇÃO NAS SIMULAÇÕES</b>	<b>78</b>
<b>TABELA 5. 2 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO <math>1 \leq R \leq 5</math> (R-HAMMING).</b>	<b>80</b>
<b>TABELA 5. 3 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO <math>1 \leq R \leq 5</math> COM ND = 350, (R-HAMMING).</b>	<b>81</b>
<b>TABELA 5. 4 - PARÂMETRO DE CASAMENTO R TENDENDO AO COMPRIMENTO DE CADA VETOR PRÓPRIO L (R-HAMMING) COM ND = 100 DETECTORES.</b>	<b>82</b>
<b>TABELA 5. 5 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO <math>1 \leq R \leq 5</math>. (R-CONTÍNUOS) COM ND = 100 DETECTORES.</b>	<b>83</b>
<b>TABELA 5. 6 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO <math>1 \leq R \leq 5</math> COM ND = 350 (R- CONTÍNUOS)</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 5. 7 - PARÂMETRO DE CASAMENTO R TENDENDO AO COMPRIMENTO DE CADA VETOR PRÓPRIO L. (R-CONTÍNUOS) E COM ND = 100 DETECTORES.</b>	<b>85</b>
<b>TABELA 5. 8 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DA VARIÁVEL PRESSÃO COMO ENTRADA DO ASN.</b>	<b>89</b>
<b>TABELA 5. 9 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DA VARIÁVEL DERIVADA DE PRESSÃO COMO ENTRADA DO ASN.</b>	<b>92</b>
<b>TABELA 5. 10 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PRESSÃO E DERIVADAS DE PRESSÃO (CONCATENAMENTO).</b>	<b>95</b>
<b>TABELA 5. 11 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PRESSÃO E DERIVADAS DE PRESSÃO (INTERVALAMENTO).</b>	<b>97</b>
<b>TABELA A. 1 - EXEMPLOS DE ALGUNS TESTES REALIZADOS PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE ENTRADA DO ASN PARA AS SIMULAÇÕES</b>	<b>108</b>

TABELA A. 2 - EXEMPLOS DE ALGUNS TESTES REALIZADOS PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE ENTRADA DO ASN PARA OS TESTES NA PLANTA FÍSICA (PT3).....	109
TABELA A. 3 - EXEMPLOS DE ALGUNS VETORES PRÓPRIOS (SELF-STRINGS) OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES DO ASN TOMANDO-SE COMO REFERENCIAL A VARIÁVEL PRESSÃO PARA OS PARÂMETROS $R = 4$ , $\epsilon = 14$ E $L = 5$ . ....	110
TABELA A. 4 - EXEMPLOS DE ALGUNS DETECTORES (PERTENCENTES AO CONJUNTO CD) OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DO ASN (FASE 1 DO ALGORITMO) PARA OS PARÂMETROS $R = 4$ , $\epsilon = 14$ E $L = 5$ (R-HAMMING). LEMBRANDO QUE A CADA EXECUÇÃO DO ALGORITMO É GERADO UM NOVO CONJUNTO CD DIFERENTE.	111
TABELA A. 5 - EXEMPLOS DE ALGUNS VETORES NÃO-PRÓPRIOS (FAULTS-STRINGS) OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES DO ASN PARA OS PARÂMETROS $R = 4$ , $\epsilon = 14$ E $L = 5$ (R-HAMMING). ....	112
TABELA A. 6 - EXEMPLOS DE ALGUNS DETECTORES GERADOS NA FASE 1 DO ASN PARA OS PARÂMETROS $R = 3$ , $\epsilon = 30$ E $L = 10$ (R-HAMMING, CONCATENADOS).....	113

## LISTA DE ABREVIações E SIMBOLOS

SIA	-	Sistemas Imunológicos Artificiais	
ASN	-	Algoritmo de Seleção Negativa	
PH	-	Potencial Hidrogeniônico	
Nd	-	Número de Detectores	
CD	-	Conjunto de Detectores	
r	-	Parâmetro de casamento	
L	-	Comprimento de cada vetor próprio	
CMB	-	Conjunto Motor Bomba	
<i>DAI</i>	-	<i>Data Acquisition Interface</i>	
P	-	Pressão	[mca]
V	-	Vazão	[m <sup>3</sup> /h]
CF	-	Cobertura de Falhas	
VCP	-	Válvula de Controle Proporcional	

## **Resumo**

### **UMA APLICAÇÃO BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Neste trabalho é apresentado um método de detecção automática de falhas, baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais, aplicado em um sistema de abastecimento de água. Este processo utiliza um Sistema de Controle Fuzzy para manter o nível de pressão estabilizado em seu princípio de operação normal do sistema. Esta plataforma de abastecimento de água é composta por sensores de pressão, válvulas, bombas e outros dispositivos. Falhas nos componentes que compõem a plataforma poderão ocorrer causando perturbações em seu funcionamento. Um algoritmo, extraído dos Sistemas Imunológicos Artificiais, denominado de Algoritmo de Seleção Negativa, é a base de detecção de falhas proposto neste trabalho. Este algoritmo verifica condições de operação anormais baseado nas condições de funcionamento normal do sistema. Resultados das simulações e experimentos acerca da utilização deste algoritmo foram obtidos comprovando a eficiência dessa técnica.

**Descritores:** Algoritmo de Seleção Negativa, Detecção de Falhas, Controlador Fuzzy

## **Abstract**

### **AN APPLICATION BASED ON ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS FOR FAULTS DETECTION IN A WATER SUPPLY PLATFORM**

In this work, an Artificial-Immune-System based anomaly detection system applied to Water Supply System is presented. At normal working, the pressure level into the system is controlled by a Fuzzy Control System. As the Water Supply System is composed of pressure sensors, valves, pumps, and other devices, faults in these devices causing abnormal disturbances can occur. An algorithm of Artificial-Immune-System, namely, the Negative Selection Algorithm, is the base of the proposed anomaly detection system. The Negative Selection Algorithm verifies abnormal system conditions based on the normal system conditions. Experimental results show that the proposed system is effective in order to detect anomaly.

**Keywords:** Negative Selection Algorithm, Fault Detection, Fuzzy Controller.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1 INTRODUÇÃO

Em alguns processos industriais, requisitos como confiabilidade e segurança de operação são fundamentais. O respeito a esses requisitos é uma forma de se evitar que falhas e erros possam ocorrer dentro do processo e assim dirimir ou eliminar: riscos à segurança dos operadores, impactos ambientais, perdas econômicas, despesas com a reparação de equipamentos danificados dentre outros. Neste contexto, a detecção prévia e o posterior isolamento de possíveis falhas em um sistema de controle de processos, ainda quando este sistema está operando em condições aceitáveis, pode ser uma ferramenta importante com o objetivo de reduzir perdas de produção e, conseqüentemente, redução de custos, insumos materiais e recursos humanos. Entretanto, atualmente, essa tarefa permanece predominantemente manual (TAVARES *et al*, 2008) e, assim, devido à complexidade dos processos industriais modernos, a tarefa de operadores humanos lidarem com a detecção de falhas tem se tornado cada vez mais difícil, pois, relacionado a isto, cerca de 70% dos acidentes industriais são causados por erros humanos (VENKATASUBRAMANIAN *e. al*, 2002).

Em outro contexto, estudo em Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), construídos baseado na inspiração do sistema imunológico natural, é uma aplicação com resultados satisfatórios para a solução de problemas computacionais após o surgimento das redes neurais e da computação evolucionária (CHANG *et al*, 2011). Tais sistemas podem fornecer ferramentas algorítmicas eficientes na detecção prévia de anormalidades em um determinado sistema. Os algoritmos oriundos de SIA são inspirados no sistema imunológico humano que possui capacidade de detecção e proteção do organismo contra agentes patogênicos. Uma das mais importantes ferramentas extraídas de SIA é o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) por sua grande possibilidade de aplicação em monitoramentos automáticos de erros (AMARAL, 2006). O Algoritmo de Seleção Negativa é inspirado no mecanismo utilizado pelo sistema imunológico humano para maturar as células T. Tais células são maturadas para reconhecer antígenos não-próprios (corpos estranhos ao organismo) e para evitar que reconheçam as próprias células do corpo.

Com base nesses contextos, esta pesquisa fundamenta-se em um estudo para elaboração de um algoritmo (e testes de aplicabilidade) que seja capaz de detectar falhas em um sistema de controle, em que, neste caso, consiste em um sistema que simula uma planta de abastecimento de água em que o controle deste sistema é implementado através da lógica fuzzy. Dessa forma, esse documento está dividido da seguinte forma: no Capítulo 1, estão descritos os objetivos e a motivação da pesquisa; no Capítulo 2, um breve comentário sobre a visão geral do sistema imunológico biológico, uma descrição do Algoritmo de Seleção Negativa bem como o levantamento de alguns estudos já existentes na área; no Capítulo 3, é descrito uma visão geral da lógica fuzzy; no Capítulo 4, a proposta de elaboração do algoritmo de detecção de falhas e a descrição da planta utilizada; no Capítulo 5, experimentos, emulações, resultados e análises acerca desses resultados e no Capítulo 6, as conclusões pertinentes e trabalhos futuros.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a utilização do conceito de Sistemas Imunológicos Artificiais em uma aplicação em um Sistema de Controle de abastecimento de água. A referência para implementação das metodologias e ferramentas utilizadas neste trabalho é o Algoritmo de Seleção Negativa (ASN).

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Apresentar um estudo aplicado sobre sistemas imunológicos artificiais e uma análise teórica do algoritmo de seleção negativa;
2. Descrever a plataforma experimental em que o algoritmo será aplicado;
3. Analisar e testar falhas inseridas neste sistema, verificando a eficiência do algoritmo proposto;
4. Possibilitar a aplicabilidade dos métodos analisados em caráter de aplicação industrial.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A concepção de sistemas artificiais inspirados na natureza não é uma ideia recente. As redes neurais artificiais, a computação evolucionária, o enxame de partículas e as colônias de formigas são alguns exemplos de técnicas utilizadas em aplicações bem sucedidas de metáforas biológicas empregadas na solução de problemas nas áreas de engenharia e computação (AMARAL, 2006).

Dessa forma, há algum tempo, os pesquisadores da área de engenharia e da ciência da computação têm mostrado interesse no sistema imunológico. A razão disto é que ele evoluiu para resolver um problema único: o de fornecer proteção ao organismo contra uma infinidade de agentes patogênicos. Espera-se que seu estudo possa fornecer novas soluções para problemas na área da engenharia e da ciência da computação ou pelo menos indicar um modo alternativo de tratá-los.

O estudo de Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) é relativamente recente e procura explorar mecanismos que são utilizados nos sistemas imunológicos encontrados na natureza com o objetivo de desenvolver técnicas de solução de problemas, especificamente nas áreas de detecção de anormalidade nos sistemas (AMARAL, 2006).

## 1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A contribuição principal deste trabalho é a aplicação de algoritmo imunológico artificial em uma plataforma de abastecimento de água experimental que se mostrou eficiente na detecção de falhas presentes nessa plataforma e que pode ser implantada em sistemas de abastecimento de grande porte visando detecção de defeitos em sua estrutura e de possíveis vazamentos de água evitando desperdício.

## **2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA**

## 2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

### 2.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

O sistema imunológico biológico compreende todos os mecanismos de proteção do organismo contra agentes patogênicos, tais como bactérias, vírus e moléculas estranhas. As células do organismo são denominadas próprias e os agentes patogênicos denominados de não-próprios. Uma das principais finalidades desse sistema é reconhecer as células dentro do corpo e classificá-las como próprias ou não-próprias (SOUZA, 2005) (JIN, 2011). Diversas propriedades do sistema imunológico biológico são de grande interesse de estudo por pesquisadores das áreas da medicina e de algumas áreas da tecnologia como a ciência da computação e a engenharia. Dentre as propriedades existentes nos sistemas imunológicos algumas são relacionadas a seguir:

- **Unicidade:** o sistema biológico de cada ser vivo é único;
- **Detecção distribuída:** os detectores utilizados pelo sistema imunológico são pequenos e eficazes, são altamente distribuídos e não estão sujeitos a um controle centralizado;
- **Detecção de anomalias:** o sistema imunológico pode detectar e reagir a agentes patogênicos com os quais não se encontrou antes;
- **Aprendizado e memória:** o sistema imunológico pode aprender as estruturas dos agentes patogênicos e “lembrar” dessas estruturas para que futuras respostas a estes agentes sejam bem mais rápidas.

Estas propriedades fazem com que o sistema imunológico seja escalável, robusto e flexível (AMARAL, 2006).

Existem dois tipos principais de mecanismos de defesa: o **inato** e o **adquirido** (ou adaptativo). Quando o organismo é invadido por um agente patogênico, o sistema inato é o primeiro a ser acionado e, em muitos casos, essa resposta protege por si só o organismo. Caso isso não aconteça, o sistema adaptativo é acionado. Como esta ação é mais específica, a resposta torna-se mais eficaz.

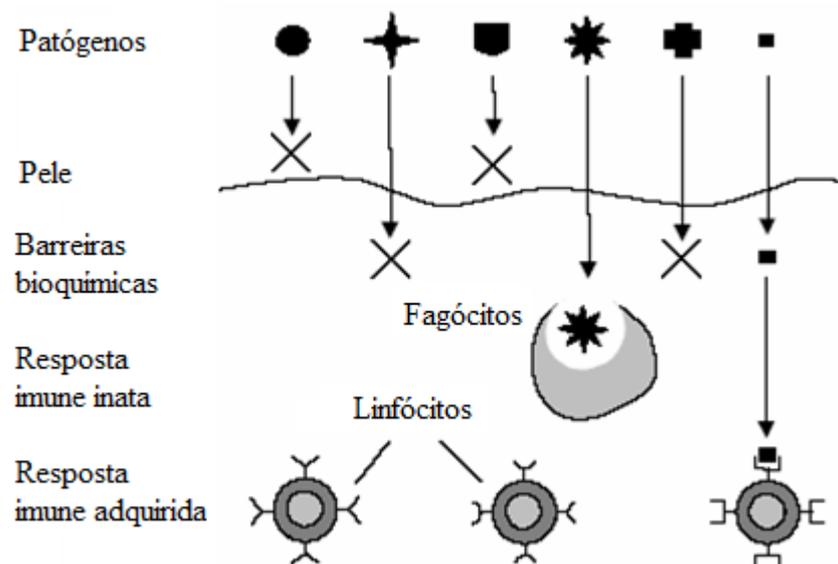
O sistema imunológico utiliza a detecção distribuída para solucionar o problema de distinguir entre o próprio e o não-próprio. Na realidade, o desempenho do sistema imunológico depende de sua habilidade de detectar elementos não-próprios nocivos (AMARAL, 2006).

A detecção de elementos não-próprios nocivos é um problema difícil, uma vez que:

- O número de padrões não-próprios, isto é, o número de proteínas (estimado em  $10^{16}$ ) que um receptor de uma célula de defesa humana é capaz de reconhecer é bem maior do que o número de proteínas diferentes fabricadas pelo corpo humano que podem ser utilizadas pelo sistema imunológico para construir receptores (estimado em  $10^6$  proteínas);
- O ambiente é altamente distribuído, isto é, não existe um controle centralizado das funções de monitoramento e detecção de agentes patogênicos;
- O organismo deve continuar funcionando.

Para solucionar este problema, o sistema imunológico desenvolveu uma arquitetura com várias camadas de defesa, conforme pode ser visto na Figura 2.1.

FIGURA 2.1 - CAMADAS DE DEFESA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO. FONTE: (AMARAL, 2006).



Esta arquitetura é composta por várias camadas de defesa, como a pele (primeira barreira contra agentes externos), barreiras bioquímicas (temperatura interna, PH, etc.) e a resposta imune inata e a resposta imune adaptativa (ou adquirida). A resposta adquirida refere-se à proteção que um organismo biológico desenvolve (através de processos específicos de aperfeiçoamento de suas células de defesa) contra certos tipos de microorganismos ou substâncias estranhas.

As principais células do sistema adaptativo são os linfócitos, também conhecidos como glóbulos brancos, que podem ser de dois tipos: T e B. Do ponto de vista de reconhecimento de padrões no sistema imunológico, a característica mais importante dessas células é que ambas possuem moléculas receptoras em sua superfície capazes de reconhecer antígenos. As células do tipo B são produzidas na **medula óssea** e se responsabilizam pela imunidade humoral combatendo organismos extracelulares (AMARAL, 2006).

As células do tipo T são assim conhecidas, devido ao seu processo de maturação ocorrer no **Timo** (glândula localizada atrás dos pulmões) ainda na vida fetal e durante a infância. Essas células são responsáveis pela imunidade celular e pelo processo de discriminação próprio e não-próprio. Durante a geração das células T, os receptores (epítomos) são criados através de um processo pseudo-aleatório de rearranjo genético. Depois, estes receptores passam por um mecanismo de monitoração no Timo denominado de seleção negativa, em que células T que reagem às proteínas do corpo são destruídas (IDRIS, 2011). Dessa forma, somente aquelas células que não se conectam as proteínas do organismo podem deixar o Timo. Estas células, que são denominadas de células maduras, circulam no organismo para realizar as funções imunológicas e proteger o organismo contra antígenos.

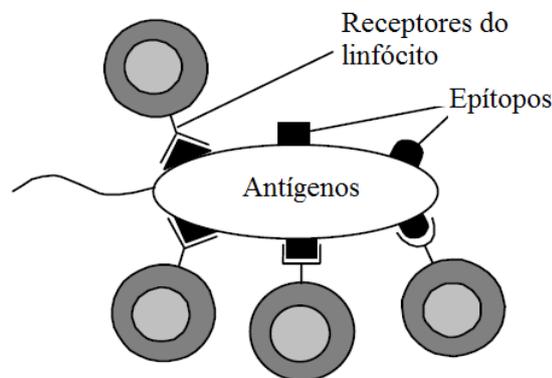
### 2.1.1 RECONHECIMENTO DOS AGENTES PATOGÊNICOS

As células responsáveis pela detecção ou reconhecimento dos agentes patogênicos no sistema imunológico adquirido são denominadas de linfócitos (ou glóbulos brancos).

Os linfócitos reconhecem os agentes patogênicos unindo-se a eles. Os agentes patogênicos (ou antígenos) são detectados quando uma ligação molecular é

estabelecida entre os agentes patogênicos e os receptores presentes nas superfícies do linfócito, conforme mostrado na Figura 2.2. Devido a um grande tamanho e a complexidade da maioria dos agentes patogênicos, apenas uma parte, denominada de epítomos, se une (reage) aos receptores do linfócito. Um receptor em particular não será capaz de se unir a todos os agentes patogênicos: quanto mais estruturas do epítomo e do receptor forem complementares, mais provável é que a união ocorra.

FIGURA 2.2 - UNIÃO ENTRE RECEPTORES E EPÍTOMOS. FONTE: (AMARAL, 2006).



Dessa forma, devido à grande quantidade e variedade de agentes infecciosos, torna-se impossível o corpo produzir uma célula T que reaja (case) plenamente com todos os epítomos de cada elemento invasor. Para suprir essa impossibilidade o corpo permite que a reação com apenas alguns dos epítomos do elemento invasor seja suficiente para a sua detecção, o que pode ser denominado de **casamento parcial**. Neste caso, uma única célula tipo T deve ser capaz de reconhecer diversos desses agentes. Isso implica que uma única célula é capaz de detectar um subconjunto de epítomos, o que é uma grande vantagem, pois uma pequena quantidade de linfócitos reconhece uma grande variedade de agentes patogênicos antígenos (AMARAL, 2006).

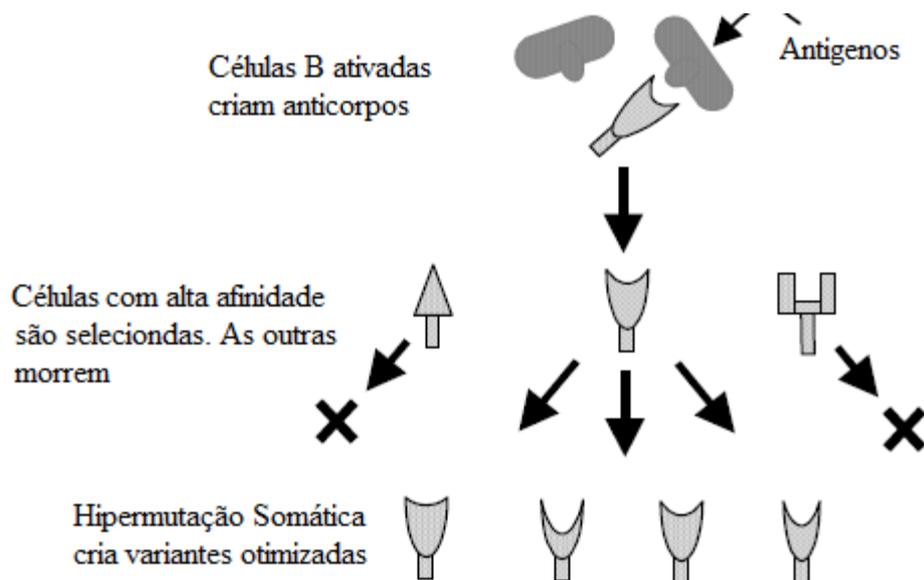
### 2.1.2 MATURAÇÃO DA AFINIDADE

Para cobrir adequadamente todos os padrões não-próprios, faz-se necessário que exista uma grande diversidade de receptores, com liminares de

afinidades relativamente baixos. Isto permite que o sistema imunológico detecte praticamente qualquer tipo de agente patogênico vivo. Entretanto esta detecção pode demorar algum tempo, durante o qual os agentes patogênicos podem se replicar e causar danos.

Dessa forma, o sistema imunológico necessita de um método para detectar e eliminar agentes patogênicos o mais rápido possível. Os linfócitos genéricos não são rápidos o suficiente para detectar agentes patogênicos, nem muito eficientes para capturá-los. Dessa forma, o sistema imunológico dispõe de mecanismos que permitem que os linfócitos aprendam as estruturas de proteínas estranhas específicas. Isto é realizado através de um processo, denominado **maturação de afinidade**, conforme pode mostrado na Figura 2.3.

FIGURA 2.3 - MECANISMO DE MATURAÇÃO DE AFINIDADE ENTRE AS CÉLULAS TIPO B. FONTE: (AMARAL, 2006).



A maturação de afinidade faz uso de um subconjunto de linfócitos denominados de células B, que possuem este nome porque sua maturação ocorre na medula óssea (*bone marrow*). Quando uma célula B é ativada, através da união com agentes patogênicos, ela primeiro expõe uma forma solúvel de seus receptores, os anticorpos, que é capaz de unir-se aos agentes patogênicos (através dos epítopos) a fim de deixá-los inativos ou para identificá-los para células do sistema imunológico inato. Em seguida, as células B são clonadas, mas as cópias

produzidas não são idênticas, pois a clonagem é sujeita a mutações com uma taxa muito alta, denominada de **hipermutação somática**. Estas novas células B também terão a oportunidade de se ligar aos agentes patogênicos. Se elas tiverem uma alta afinidade com os agentes externos, elas serão, por sua vez, ativadas e clonadas.

Dessa forma, à medida que a população de células B passa pela maturação de afinidade, ela evolui células B com uma maior afinidade aos agentes patogênicos, isto é, células B mais eficientes serão produzidas para detectar e capturar estes agentes.

### 2.1.3 TOLERÂNCIA AO PRÓPRIO

Receptores que são gerados aleatoriamente e sujeitos à mudanças aleatórias através de hipermutação poderiam facilmente unir-se a padrões próprios e iniciar respostas autoimunes. Entretanto, isto raramente acontece, pois geralmente o sistema imunológico é tolerante ao próprio, isto é, ele “não ataca” o próprio.

Esta tolerância é implementada através de outra classe de linfócitos denominados de células T *helper*, porque elas amadurecem no timo e auxiliam as células B. Como a grande maioria das proteínas do organismo circula pelo timo, portanto as células T que estão amadurecendo nesta glândula são expostas a estas proteínas. Caso uma célula T se unir (reagir) a alguma dessas proteínas, ela será removida através de um processo denominado *clonal deletion* (eliminação clonal), conforme mostrado na Figura 2.4. As células T que sobrevivem ao processo de maturação são tolerantes a maior parte das proteínas do organismo. Esta tolerância é centralizada, pois células T imaturas são toleradas em um único local.

Assegurar a tolerância de células B é um problema mais complexo, porque a maturação dessas células é distribuída (AMARAL, 2006). Dessa forma, é necessário um sistema de controle distribuído para garantir a tolerância ao próprio. As células T *helper* fazem este controle através de um mecanismo conhecido como **co-estimulação**. Para ser ativada, uma célula B precisa receber co-estimulação na forma de dois sinais: o primeiro sinal ocorre quando o número de agentes patogênicos que se unem (através dos epítomos) aos receptores ultrapassa um determinado limiar e o segundo sinal é fornecido pelas células T *helper*. Elas irão

fornecer este sinal apenas se reconhecerem o agente patogênico que a célula B capturou. Este processo de co-estimulação conforme mostrado na Figura 2.5.

FIGURA 2.4 - MECANISMO DE MATURAÇÃO DAS CÉLULAS T. FONTE: (AMARAL, 2006).

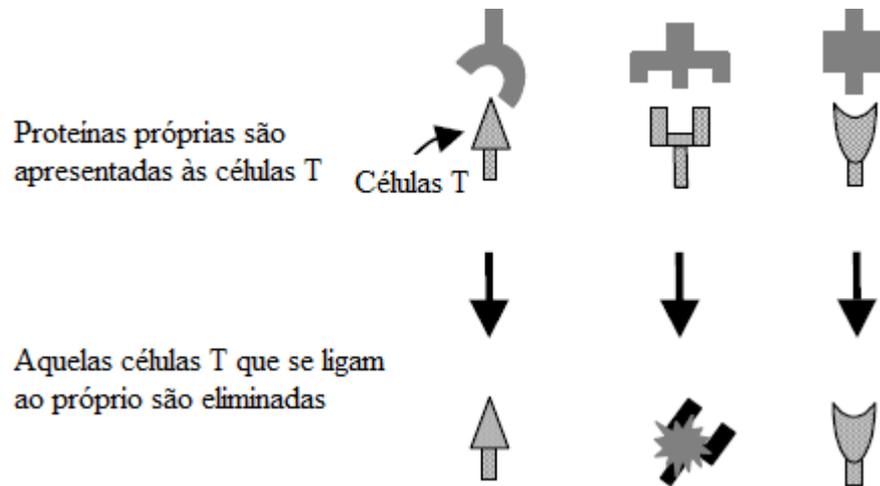
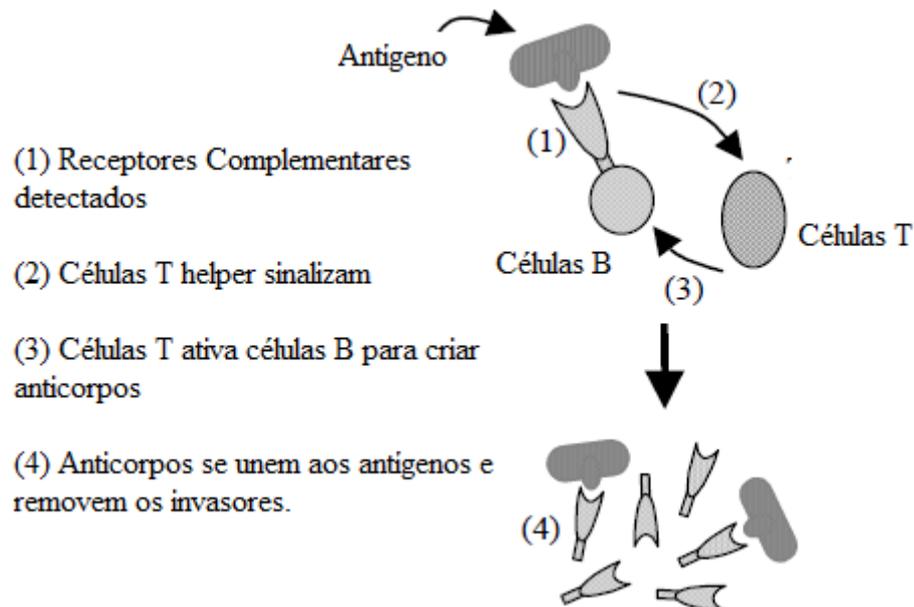


FIGURA 2.5 - PROCESSO DE CO-ESTIMULAÇÃO. FONTE: (AMARAL, 2006).



## 2.2 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

O Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) é inspirado no mecanismo utilizado pelo sistema imunológico para treinar as células T (seleção negativa) e este processo é considerado um dos maiores mecanismos pertencentes ao complexo sistema imunológico. Tais células são treinadas para reconhecer antígenos (não-próprio) e para evitar que reconheçam as próprias células do corpo (próprio) (LIMA, 2013). A ideia é gerar um conjunto de detectores, primeiramente criando candidatos de maneira aleatória e, então, descartando aqueles que reconhecem os dados relacionados ao próprio.

Baseado na proposta de Forrest (1994), o algoritmo possui três passos básicos:

- **Definição do conjunto de dados Próprios:** Defina próprio como uma coleção de cadeias/vetores de tamanho limitado, que necessite de proteção ou monitoramento. Nesta abordagem, este conjunto próprio é denominado de **vetores próprios P**;
- **Fase de Geração de Detectores:** Gere **vetores aleatórios** e avalie a similaridade entre cada uma deles e os vetores próprios. Caso a similaridade (correspondente a um critério de comparação entre dois elementos de uma mesma cadeia) seja igual (ou superior) a um determinado limiar, isto indica que houve um reconhecimento (detecção) do conjunto próprio, e que, portanto, a cadeia/vetores deve ser rejeitada; caso contrário armazene-a em um **conjunto de detectores CD**. De maneira geral, os candidatos a detectores são gerados aleatoriamente e testados individualmente para verificar se casam com algum vetor pertencente a P. Esta etapa pode ser vista pela Figura 2.6;
- **Fase de Monitoramento:** Monitore possíveis alterações no conjunto de vetores próprios P que se deseja proteger (passíveis de ocorrência de erros) utilizando os detectores em CD gerados anteriormente. Caso a similaridade entre um detector de CD e uma das cadeias/vetores de P seja maior (ou

igual) a um limiar pré-estabelecido, diz-se que uma anomalia ocorreu, tendo em vista que os detectores nunca devem reconhecer cadeias do conjunto próprio. Esta etapa pode ser vista pela Figura 2.7.

Conforme mencionada outrora, a similaridade consiste na comparação entre dois elementos de uma mesma cadeia, baseada em critérios de comparação parcial, definida por um parâmetro de comparação. Esta similaridade é inspirada no casamento parcial em que ocorre a reação com alguns dos epítomos de um elemento invasor com a superfície de uma célula do tipo T.

FIGURA 2.6 - FASE DE GERAÇÃO DE DETECTORES SEGUNDO O ASN.

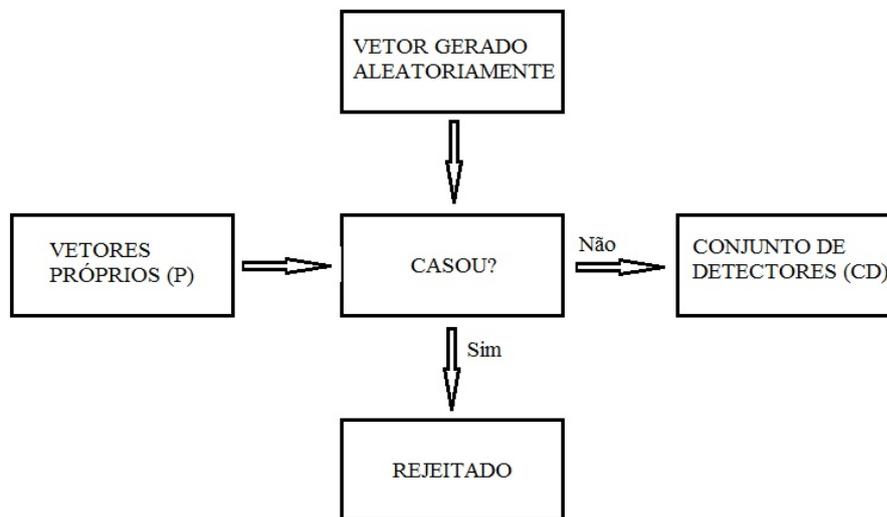
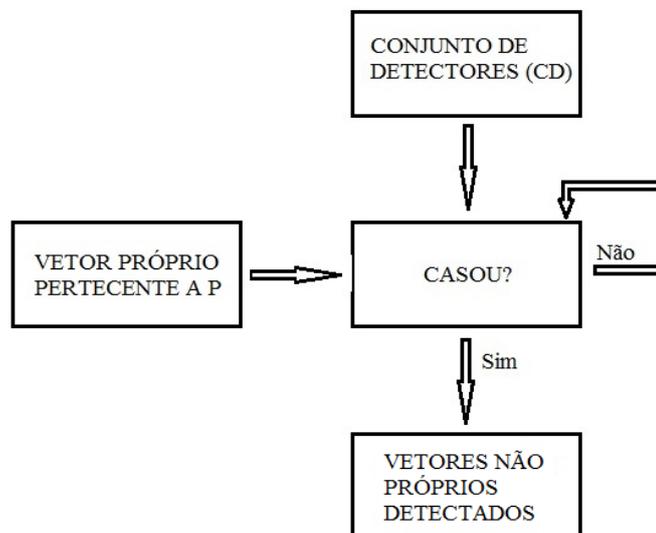


FIGURA 2.7 - FASE DE MONITORAMENTO SEGUNDO O ASN



A aplicação principal do ASN tem sido na área de detecção de anomalias, em que os detectores são gerados de maneira que eles possam detectar alterações nos padrões dos dados (GUO, 2012). O principal componente do algoritmo de seleção negativa é a escolha da regra de detecção, que determina a similaridade entre dois padrões de modo a classificar as amostras em próprio/não-próprio (normal/anormal). Uma estimativa do tamanho de detectores é necessária para assegurar certo nível de confiabilidade na detecção da anomalia. Se um limiar de detecção muito alto for utilizado, os detectores gerados tornar-se-ão sensíveis a qualquer anomalia nos dados, e, portanto, um maior número de detectores será necessário para atingir o grau de confiabilidade desejado. Por outro lado, se o limiar for muito baixo, pode ser impossível gerar um conjunto de detectores de tamanho razoável a partir do conjunto próprio disponível. Isto sugere que o valor do limiar pode ser utilizado para ajustar a sensibilidade da detecção e diminuir o risco de falso-positivos (AMARAL, 2006).

### 2.3 CRITÉRIOS DE CASAMENTO PARCIAL

No Algoritmo de Seleção Negativa faz-se necessário definir um critério de casamento parcial para a execução das fases de geração de detectores e de monitoramento. Um casamento completo (perfeito) implicaria dizer que cada elemento de um vetor casa exatamente com o do detector, isto é, cada detector irá detectar apenas um único vetor (SOUZA, 2005). A utilização de um casamento parcial tem como objetivo fazer com que cada detector tenha sua capacidade de detecção aumentada. Para prover o casamento parcial entre dados em um sistema de monitoramento serão utilizados os critérios de **r-Contínuos** e o **r-Hamming**, que são bastante comuns para este tipo de aplicabilidade. Ambos os critérios são controlados através do parâmetro  $r$  (parâmetro de casamento).

#### 2.3.1 CRITÉRIO DE CASAMENTO R-CONTÍNUOS

Este critério foi proposto por Forrest (1994) e consiste em verificar se dois vetores de comprimentos iguais e que possuam símbolos em um alfabeto pré-

definido casam em pelo menos  $r$  posições de forma contínua. Por exemplo, suponha que dois vetores binários A e B de comprimentos iguais e pertencentes ao mesmo alfabeto sejam apresentados, conforme visto na Figura 2.8. Estes vetores casam para qualquer  $r \leq 5$ , utilizando o critério de casamento  $r$ -contínuos.

FIGURA 2.8 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-CONTINUOS. OS VETORES A E B CASAM PARA  $r \leq 5$

$$A = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$B = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

### 2.3.2 CRITÉRIO DE CASAMENTO R-HAMMING

Este critério é baseado na distância de *hamming* e consiste em verificar se dois vetores de comprimentos iguais e pertencentes ao mesmo alfabeto casam em pelo menos  $r$  posições correspondentes, mas não necessariamente de forma contínua. Por exemplo, suponha que sejam utilizados novamente dois vetores binários A e B conforme mostrado na Figura 2.9. Estes vetores casam para qualquer  $r \leq 9$ , utilizando o critério de casamento  $r$ -hamming.

FIGURA 2.9 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-HAMMING. OS VETORES A E B CASAM PARA  $r \leq 9$

$$A = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$B = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$$

### 2.3.3 CRITÉRIO DE CASAMENTO PARA CASOS COM VETORES REAIS

Existem diversas técnicas para realizar a comparação entre dois vetores cujos elementos são formados por números reais (GONZALES *et al*, 2003). Nesta pesquisa, para esta finalidade, é utilizada uma variável auxiliar denominada desvio ( $\epsilon$ ). Assim, as posições correspondentes do vetor erro casam se a diferença, em módulo, entre esses dois vetores for menor ou igual ao desvio (erro absoluto) pré-

estabelecido. Por exemplo, suponha que sejam apresentados dois vetores reais A e B de comprimentos iguais, pertencentes ao mesmo alfabeto e que o desvio escolhido para promover a comparação entre eles seja  $\epsilon = 0,2$ . Estes vetores podem ser observados através da Figura 2.10. Dessa forma, o vetor Z é formado pelo casamento, neste caso utilizando o critério r-hamming, em que 1 é o bit representativo caso a diferença entre o valor de cada elemento do vetor A com cada elemento de B for menor (ou igual) ao o desvio  $\epsilon$  e 0 caso contrário.

FIGURA 2.10 - EXEMPLO DE CASAMENTO PARCIAL (COM VETORES REAIS) ATRAVÉS DO CRITÉRIO R-HAMMING. OS VETORES A E B CASAM PARA  $r \leq 5$

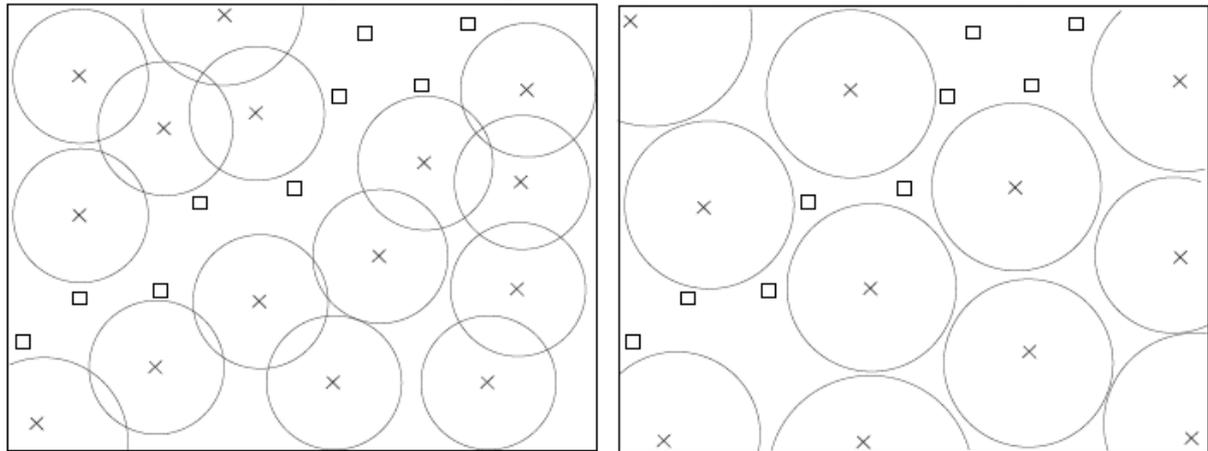
$$\begin{aligned} X &= [1,20 \ 0,50 \ 1,80 \ \mathbf{0,95} \ \mathbf{2,00} \ 3,10 \ 0,60 \ \mathbf{1,30} \ \mathbf{0,64} \ 2,54] \\ Y &= [1,40 \ 1,00 \ 2,30 \ \mathbf{0,76} \ \mathbf{2,10} \ 1,54 \ 1,00 \ \mathbf{1,19} \ \mathbf{0,78} \ 1,32] \\ Z &= [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1 \quad 0] \end{aligned}$$

Na Figura 2.11(a) é ilustrada, de maneira geral, em um espaço bidimensional, a ideia básica acerca de espaços de detecção e sua relação com o parâmetro  $r$ . Nesta figura, os quadrados pequenos representam os vetores próprios, os símbolos x representam os detectores e os espaços de detecção são representados por círculos. Observa-se que sobreposições de espaços de detecção podem ocorrer. Isto significa que mais de um detector é capaz de detectar um mesmo vetor não-próprio, ou seja, existem detectores redundantes para cobrir o espaço não-próprio. O caso ideal, em relação ao número de detectores, é mostrado na Figura 2.11(b) em que não existe sobreposição de espaços de detecção.

Casos extremos podem ocorrer: quando o raio de cobertura  $r$  tende ao comprimento do vetor  $l$  ( $r \rightarrow l$ ) e quando o raio de cobertura tende a 1 ( $r \rightarrow 1$ ). Isto pode ser observado pelas Figuras 2.11(c) e 2.11(d), respectivamente. No primeiro caso, o espaço de detecção de cada detector é bastante reduzido resultando em um grande número de detectores para a detecção dos vetores não-próprios. Também, neste caso, ocorre à tendência do casamento, entre os vetores, deixar de ser parcial (que aumenta a cobertura de detecção de falhas) para ser completo (em que um detector é capaz de estar associado apenas a um vetor de falha). No segundo caso,

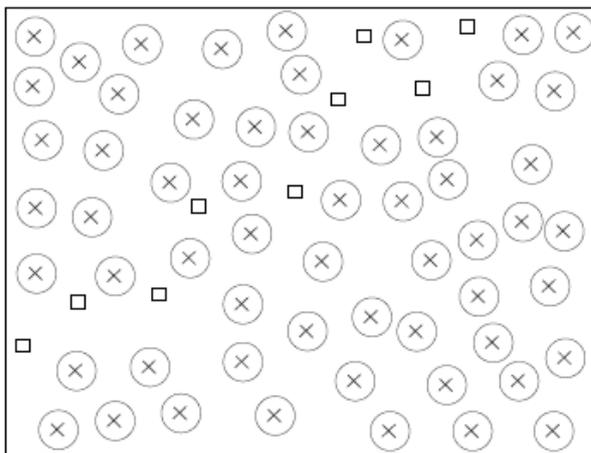
cada detector possui um grande espaço de detecção, no entanto, a geração de tais detectores é computacionalmente difícil (SOUZA, 2005).

FIGURA 2.11 - RELAÇÃO ENTRE ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM O PARÂMETRO  $r$ . OS VETORES PRÓPRIOS SÃO REPRESENTADOS POR  $\square$ , DETECTORES POR  $\times$ , ESPAÇOS DE DETECÇÃO POR  $\circ$ . (A) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM PARÂMETRO  $r$  ADEQUADO, MAS, COM OCORRÊNCIA DE SOBREPOSIÇÃO. (B) SEM OCORRÊNCIA DE SOBREPOSIÇÃO. (C) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM ( $r \rightarrow l$ ). (D) ESPAÇOS DE DETECÇÃO COM ( $r \rightarrow 1$ ). FONTE: (SOUZA, 2005)

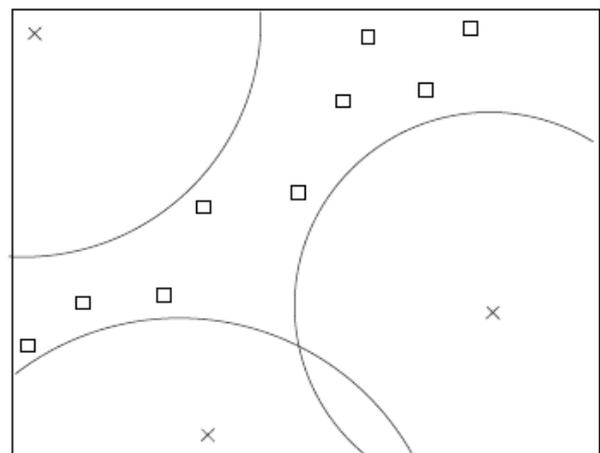


(a)  $1 < r < l$  (com sobreposição)

(b)  $1 < r < l$  (sem sobreposição)



(c)  $r \rightarrow l$



(d)  $r \rightarrow 1$

## 2.4 PROBABILIDADE DE ERRO DE DETECÇÃO

Considere que exista um conjunto de detectores  $d$  e deseja-se saber qual a probabilidade que esses detectores não detectem um elemento não-próprio ao

sistema, ou seja, qual a probabilidade de erro na detecção de uma mudança ocorrida em algum elemento próprio ao sistema não ser relatada, segundo a fase de monitoramento do ASN proposto por Forrest. Dessa forma, para responder a esta questão, faz-se necessário saber a probabilidade de que dois vetores aleatórios casem de acordo com um dado critério de casamento.

Para o critério de casamento **r-contínuos**, a probabilidade  $P_C$  de que dois vetores aleatórios casem em pelo menos  $r$  posições contínuas é dada pela equação 2.1:

$$P_C \approx \frac{1}{p^r} \left[ \frac{(l-r)(p-1)}{(p+1)} \right] \quad (2.1)$$

em que  $l$  é o comprimento do vetor próprio e  $p$  é a quantidade de símbolos do alfabeto (para o caso binário  $p = 2$ ). Esta equação é aplicável quando a condição  $\frac{1}{p^r} \ll 1$  é satisfeita (SOUZA, 2005).

Para os casos em que a condição  $\frac{1}{p^r} \ll 1$  não é atendida, pode-se utilizar a equação 2.2 para verificar a probabilidade de casamento utilizando o critério de casamento **r-contínuos** (STIBOR *et al*, 2006).

$$P_C \approx \left( \frac{1-ax}{(r+1-rx)b} \right) \cdot \left( \frac{1}{x^{l+1}} \right) \quad (2.2)$$

em que  $l$  é o comprimento do vetor próprio,  $r$  é o parâmetro de casamento,  $a = b = \frac{1}{2}$  e  $x = 1 + ab^r + (r+1) \cdot (ab^r)^2 + \dots$ . (STIBOR *et al*, 2006).

Para o critério de casamento **r-hamming**, (quaisquer condições) a probabilidade  $P_H$  de que dois vetores aleatórios casem em pelo menos  $r$  posições por este critério (SOUZA, 2005) é dada pela equação 2.3:

$$P_H = \frac{1}{p^l} \left[ \sum_{i=r}^l \binom{l}{i} (p-1)^{l-i} \right] \quad (2.3)$$

De maneira geral, a probabilidade  $P_M$  (seja utilizando o critério r-contínuos ou r-hamming) que  $d$  detectores falhem em detectar **um** vetor não-próprio, isto é, a probabilidade de erro de detecção  $P_e$  será dada pela equação 2.4 (SOUZA, 2005):

$$P_e = (1 - P_M)^d \quad (2.4)$$

Dessa forma, quanto maior for a quantidade de detectores menor será a probabilidade de erro de detecção  $P_e$ . Além disso, quanto maior a probabilidade de casamento  $P_M$  menor será a probabilidade de erro de detecção  $P_e$ .

## 2.5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

Com o objetivo de uma melhor compreensão do algoritmo de seleção negativa, é descrito o exemplo a seguir:

Considere que foram definidas como vetores próprios, dados a serem monitorados, tomando os seguintes vetores de 4 bits cada:  $P = \{0010, 1000, 1101, 0000, 0100, 0010, 1001, 0011\}$ . A fase de geração de detectores consistirá em gerar vetores aleatórios (conjunto D) e, então, verificar se os vetores em D casam com algum vetor em P. Caso algum vetor em D casar com qualquer vetor próprio em P, então este vetor é descartado. Aqueles que não forem descartadas tornam-se membros da coleção de vetores detectores, formando o conjunto de detectores (CD).

Por exemplo, suponha  $D = 0111 \ 1000 \ 0101 \ 1001$  (formado por quatro vetores aleatórios). Dessa forma, CD consistirá de dois vetores, 0111 e 0101, pois os demais vetores (1000 e 1001) são descartados porque cada um deles casa com um vetor em P. Na realidade, o procedimento consiste em gerar vetores aleatórios

continuamente até que o conjunto CD contenha um número adequado de detectores.

Considerando, agora, que em P seja possível a ocorrência de erros, a fase de monitoramento de erro irá verificar, de maneira contínua, se detectores em CD casam com algum vetor em P.

Por exemplo, suponha que um bit do último vetor próprio (0011) mude, produzindo o vetor 0111. Assim, em algum ponto da fase de monitoramento, é verificado que o vetor não-próprio 0111 case com algum dos detectores (nesse caso o detector 0111), e um erro em P será relatado, ou seja, o algoritmo detectou um erro (anomalia).

## 2.6 ESTUDOS RELACIONADOS

Baseando-se em um levantamento realizado em diversas publicações científicas, vários estudos foram realizados acerca dos critérios de casamento e de aplicações referentes ao Algoritmo de Seleção Negativa. A seguir são descritos alguns destes estudos:

Em (DASGUPTA & FORREST, 1996a) é utilizado um método para detecção de anomalias em séries temporais baseados no ASN. Neste método, os autores utilizam o espaço de Hamming binário para representar os dados a serem protegidos e a regra de detecção dos r-bits.

Castro (CASTRO, 2001c) apresenta um algoritmo de aprendizagem para a rede imunológica *aiNet*. Esta rede faz uso de vetores de números reais e é empregada em problemas de análises de dados.

Kim (KIM *et al.*, 2002) descreve um sistema de detecção de anomalias para combater fraudes no comércio baseado na seleção negativa. A noção de próprio é obtida escrevendo-se regras para descrever as transações mais frequentes. A partir dessas regras, uma variação do ASN é aplicada para gerar regras que indiquem transações incomuns.

Taylor (TAYLOR & CORNE, 2002) apresenta uma investigação do ASN na detecção de falhas em sistemas de refrigeração. As falhas no sistema são verificadas através de padrões anormais na temperatura.

Ayara (AYARA *et al.*, 2002) revisou e estudou cinco esquemas diferentes para a geração de detectores binários: exaustivo, linear, *greedy*, *binary template* e *NSMutation*.

Gonzales (GONZALES *et al.*, 2003a) analisaram e compararam diferentes regras de detecção binárias na seleção negativa: *r*-contínuos, *r-chunks*, e por distância de Hamming.

Amaral (AMARAL *et al.*, 2004a-b) descreve um sistema de diagnóstico de falhas de circuitos analógicos baseado em decomposição *wavelet* e em sistemas imunológicos artificiais. Tal sistema é capaz de detectar e identificar componentes com falhas em circuitos analógicos analisando a resposta ao impulso. A utilização da decomposição *wavelet* no pré-processamento da resposta ao impulso reduz dramaticamente o tamanho do detector usado pelo algoritmo RNSA (*Real-valued Negative Selection Algorithm*).

Bradley (BRADLEY & TYRRELL, 2006) apresenta um mecanismo de tolerância a falhas baseado na distinção próprio/não-próprio, por ele denominado *Imunotronics*. Este mecanismo é aplicado na detecção de falhas em uma máquina de estados.

Idris (ISMAILA & SELAMAT, 2011) apresenta a utilização do ASN para a detecção e classificação de *e-mails* recebidos por um destinatário específico em spam e não-spam. O algoritmo foi implementado para verificar se um *e-mail* recebido foi reconhecido como spam (e posteriormente deletados caso seja) daquele(s) que não é (são) considerado(s) spam. Houve um estudo para definir um limiar que serviu de referência de classificação em próprio (não-spam) de não-próprio (spam).

Abdelhadi (ABDELHADI, 2012) estudou e comparou três algoritmos relacionados aos Sistemas Imunológicos Artificiais: o Algoritmo de Seleção Negativa, o Algoritmo de Seleção Clonal e o Algoritmo de Células Dendríticas para estudos visando à classificação de anormalidades em controles industriais. Foram realizadas diferenças e semelhanças entre cada um dos algoritmos analisados e verificado qual deles atendia, com maior eficiência, respostas às anormalidades inseridas nestes controles de processos.

### **3 LÓGICA FUZZY**

### 3 LÓGICA FUZZY

#### 3.1 LÓGICA FUZZY

A lógica fuzzy surgiu com base na Teoria de Conjuntos Fuzzy, no ano de 1965, em que a primeira vez foi utilizado o termo “lógica fuzzy” na publicação feita por Lotfi A. Zadeh nos Estados Unidos (MALUTTA, 2004). O termo em inglês “fuzzy” traduzido, tem o significado como algo vago, indefinido, incerto. Mas traduzido para o português os termos mais utilizados na área de inteligência artificial são nebuloso ou difuso. A lógica fuzzy trata de um raciocínio que busca classificar em números uma determinada realidade ou situação, que trabalha com muitas variáveis incertas e vagas, a fim de facilitar o trabalho ou manipulação dos computadores (SIMÕES, 2007).

A lógica fuzzy ou lógica difusa é uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre o ‘falso’ (0) e o ‘verdadeiro’ (1), podendo assumir, por exemplo, o valor intermediário ‘talvez’ (0,5). Isto significa que um valor lógico difuso é um valor qualquer no intervalo de valores entre 0 e 1 podendo abrir muitas possibilidades de desenvolver soluções para problemas que envolvam muitas variáveis.

Esta lógica incorpora a forma humana de pensar, substituindo as decisões rígidas tomadas, por meio de regras baseados em dois valores lógicos: “verdadeiro ou falso”. Através de suas teorias as variáveis podem assumir valores intermediários criando situações que recebem valores lógicos equivalentes, por exemplo, a “pouco verdadeiro” ou “quase falso” (SIMÕES, 2009).

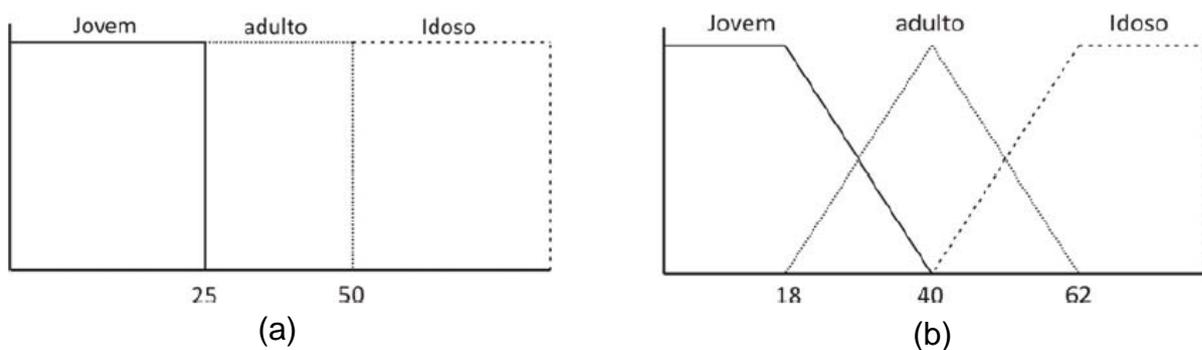
Através de uma determinada regra, que varia para qual fim a lógica fuzzy é utilizada, os dados coletados caracterizados como incertos são analisados de acordo com a regra implementada e aproximados por números para possibilitar a interpretação das máquinas e computadores. Essa característica dispensa a necessidade, presente nos controles tradicionais, de se fazer a modelagem matemática do sistema. Nos modelos matemáticos, geralmente na forma de equações diferenciais, muitas restrições são feitas a fim de alcançar resultados. A consideração de que o processo é linear (pelo menos em torno de alguns pontos de operação) e que o sistema é invariante com o tempo (apesar de na realidade ocorrer

deterioração dos componentes do sistema, etc) são algumas das simplificações consideradas pelo projetista na tentativa de encontrar uma descrição matemática para o processo.

Nos sistemas Fuzzy o conhecimento matemático não é tão necessário, entretanto, o projetista necessita de uma profunda compreensão de como as imprecisões e incertezas ocorrem em seus processos e como elas interferem as aplicações do seu controlador, possibilitando a configuração dos objetivos almejados. Dessa forma, devido ao fato de emular a inteligência humana, a Lógica Fuzzy é referida como inteligente. Os assim chamados “sistemas inteligentes” são aqueles que fornecem respostas que solucionam problemas, tais respostas apropriadas às situações específicas destes problemas, mesmo que sejam novas ou inesperadas, fazendo com que cada comportamento seja único ou até mesmo considerado criativo (SIMÕES, 2009).

Dessa forma, para explicar o conceito da Lógica Fuzzy e sua diferença com a Lógica Booleana pode ser observado um exemplo típico que pode ser visto na Figura 3.1.

FIGURA 3.1 - CONJUNTO IDADE NAS ABORDAGENS BOOLEANA (A) E FUZZY (B). FONTE: (CAMBOIM, 2012).



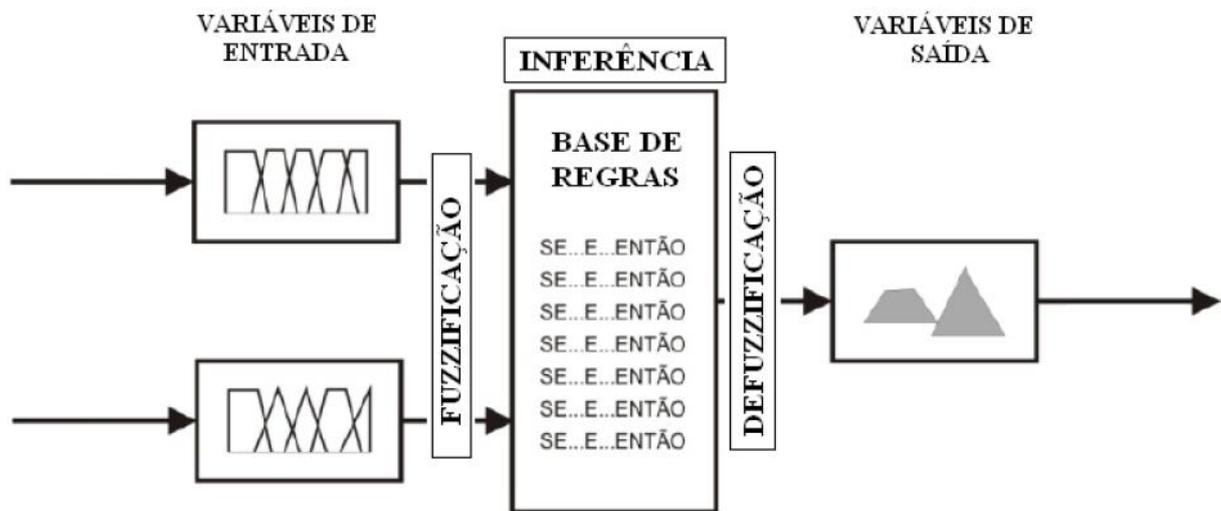
Observa-se, na abordagem booleana Figura 3.1(a), que as transições entre os conjuntos “jovem” e “adulto”, e entre os conjuntos “adulto” e “idoso”, são bruscas. Uma pessoa que passar dos 24 anos e 11 meses para os 25 anos em um dia, deixa de pertencer à categoria “jovem” e passa diretamente para a categoria “adulto”. Essa abordagem é incompatível com a lógica de pensamento humano. Já na abordagem Fuzzy conforme visto na Figura 3.1(b), observa-se que as transições são suaves, sendo que o indivíduo, a partir dos 18 anos, deixa de ser 100% “jovem” e começa a

pertencer parcialmente aos conjuntos “jovem” e “adulto”. É importante observar o conceito de **grau de pertinência** nesta associação. Este define o “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto, variando geralmente no intervalo entre 0 a 100%.

O processo de tomada de decisão por meio da Lógica Fuzzy segue o diagrama de dados que pode ser visto na Figura 3.2. Este processo é composto pelos seguintes blocos funcionais:

- Fuzzificação;
- Inferência Fuzzy;
- Defuzzificação.

FIGURA 3.2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM CONTROLADOR FUZZY. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



### 3.1.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

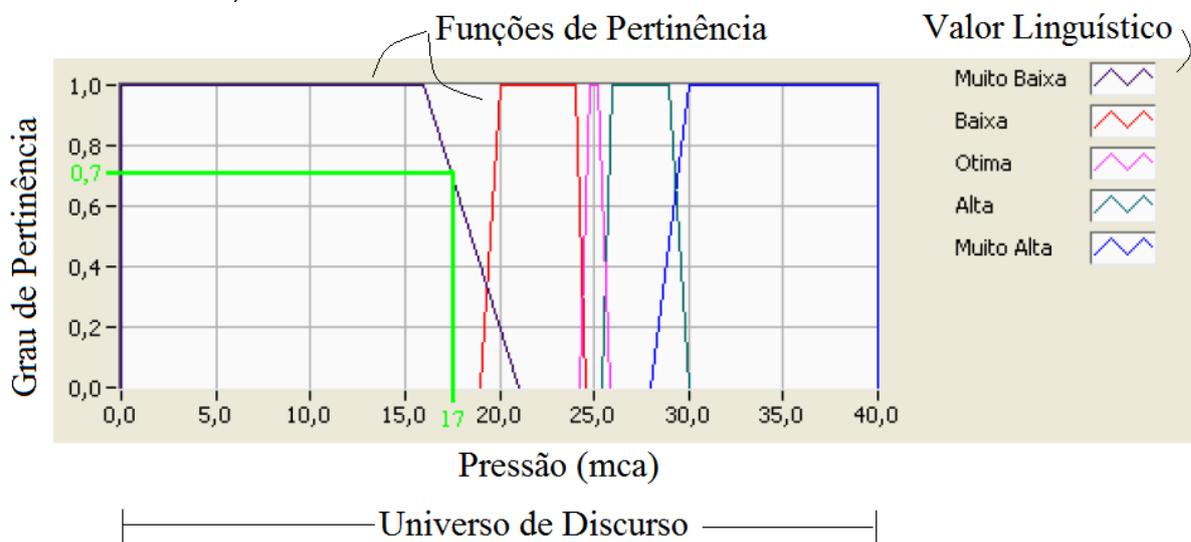
Antes de iniciar o processo Fuzzy, devem-se definir as variáveis que estarão envolvidas no processo. As variáveis (de entrada e de saída) são as grandezas que darão suporte para a tomada de decisão ou as grandezas a serem controladas. A Lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e

qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores e as variáveis podem assumir seus próprios nomes.

Para cada **variável linguística** deve ser adotado um **universo de discurso**, que serão todos os valores que a variável poderá assumir. Dessa forma, para cada variável de entrada, são criadas **funções de pertinência** dentro desse universo de discurso, que por meio do grau de pertinência atribuído à função definirá o valor da entrada. Por exemplo, a pressão do sistema (variável de entrada) poderá assumir valores muito baixo, baixo, ótimo, alto e muito alto (funções de pertinência), inclusive podendo assumir mais de um valor linguístico, evidentemente com diferentes graus de pertinência.

Um exemplo de definição de variável e valor linguístico pode ser visto na Figura 3.3 em que é atribuído um valor de 17 mca da variável de entrada de pressão cujo valor linguístico assumido será “muito baixa” com grau de pertinência 0,7. As funções de pertinência indicam o quanto um elemento pertence a um dado conjunto.

FIGURA 3.3 - DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLADOR FUZZY. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



### 3.1.2 FUZZIFICAÇÃO

Fuzzificação é um processo de pesquisa entre as funções para obter os graus de pertinência (JANTZEN, 2007). É um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio Fuzzy. A fuzzificação também representa que há atribuições de

valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada.

Na fuzzificação elabora-se um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio Fuzzy. A fuzzificação é uma espécie de pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo enormemente o número de valores a serem processados. Então o processo de fuzzificação consiste em atribuir um grau de pertinência referente a cada função de pertinência, para os valores de entradas em suas respectivas variáveis.

Nesse sentido, utilizando o exemplo da Figura 3.3, tem-se que o equivalente Fuzzyficado da entrada 17 mca na variável de entrada do controlador pertencerá apenas à função de pertinência muito baixa com grau de pertinência 0,7 e todas as outras funções de pertinência Fuzzy com grau de pertinência 0,0. Dessa forma, o vetor Fuzzy equivalente ao número discreto 17 mca seria {0,70 0,00 0,00; 0,00 0,00}. Para alguns valores da variável de entrada, são definidos alguns vetores Fuzzy, conforme mostrados na Tabela 3.1.

TABELA 3. 1 - VETORES FUZZY BASEADOS EM VARÍÁVEIS DE ENTRADA

Variável de Entrada - Pressão (mca)	Vetor Fuzzy correspondente
17	(0,70 0,00 0,00 0,00 0,00)
20	(0,20 0,95 0,00 0,00 0,00)
25	(0,00 0,00 1,00 0,00 0,00)
28	(0,00 0,00 0,00 0,95 0,40)
35	(0,00 0,00 0,00 0,00 1,00)

### 3.1.3 BASE DE REGRAS

A base de regra relaciona as variáveis do controlador, obtendo conclusões a partir das variáveis de entrada. Os sistemas Fuzzy raciocinam com os conjuntos linguísticos, definidos pelas variáveis de entrada e de saída, ao invés de proposições lógicas bivalentes (modelo booleano). A forma geral de uma inferência Fuzzy é:

**SE**<condições>**ENTÃO**<conclusão>.

**SE** pressão = < muito alta> E vazão =<baixa>**ENTÃO** válvula<abrir>.

O conectivo mais utilizado é o “E”, aplicado como multiplicativo. Porém conectivos do tipo “E NÃO”, contrários ao anterior também são possíveis. O que geraria regras do tipo:

**SE** pressão = < muito baixa> E **NÃO** =<zero>**ENTÃO** ....

A determinação de como as regras são ativadas e combinadas, bem como a forma como ocorrem às operações com os conjuntos Fuzzy é definida pelo tipo de inferência do controlador.

### 3.1.4 DEFUZZIFICAÇÃO

Uma vez realizadas as avaliações das proposições (regras) Fuzzy deve-se determinar o valor real da saída do sistema. Este processo é denominado Defuzzificação. Para situações que requerem uma resposta numérica, o conjunto Fuzzy da saída é transformado num valor único pelo processo de defuzzificação, ou seja, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras Fuzzy será traduzido em um valor discreto (BEZERRA, 2009). O objetivo é obter-se um único valor numérico discreto que melhor represente os valores Fuzzy inferidos da variável linguística de saída, ou seja, a distribuição das possibilidades. Assim, a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio Fuzzy para o domínio discreto.

## 3.2 CONTROLE DE PROCESSO FUZZY

Os métodos de controle de processos clássicos são geralmente baseados na hipótese de que os sistemas são lineares e estacionários, e raramente consideram as incertezas e as imprecisões da planta, promovendo, para efeitos analíticos, uma modelagem da mesma (HARRIS *et al*, 1993). O controlador fuzzy não necessita de um modelo analítico completo do processo e nem de modelagem.

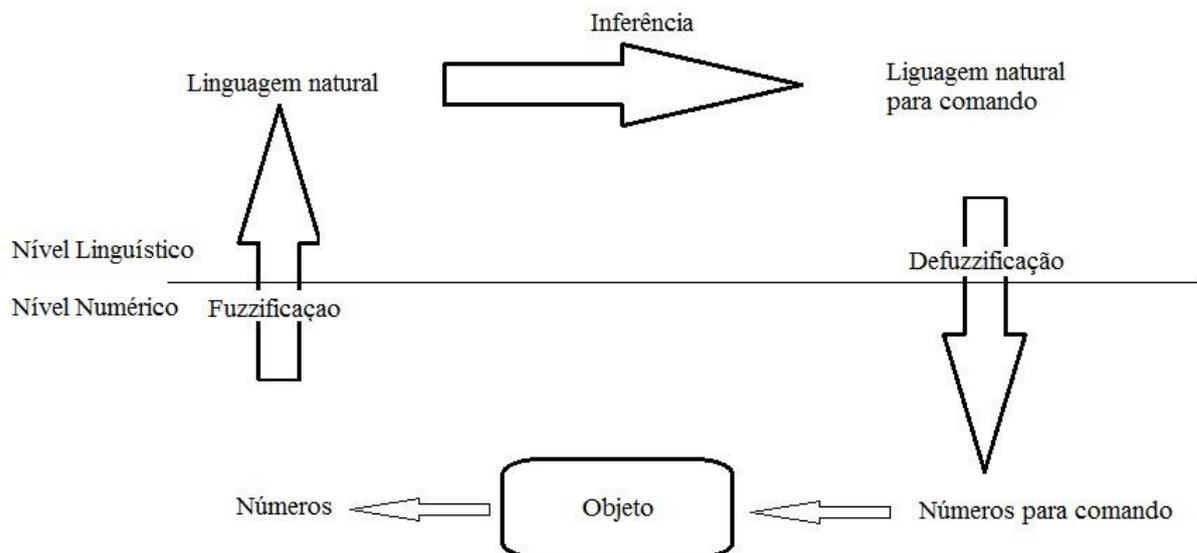
Ele calcula suas ações em função de uma base heurística de conhecimentos do processo, e esta pode ser complexa, mal conhecida (modelo impreciso) e incerta (BERENJI, 1992). O controle fuzzy opera com uma função não linear entre as variáveis de entrada e de saída, e reflete os conhecimentos que os operadores e/ou engenheiros possuem do processo.

Um sistema especialista clássico tem uma regra para cada situação. Um sistema baseado na lógica fuzzy permite generalizar estas regras e inferi-las dentro do universo de referência de cada variável controlada.

### 3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Toda lógica fuzzy está relacionada ao raciocínio fuzzy, que, conforme descrito anteriormente, é composto por três etapas que são a fuzzificação, a inferência e a defuzzificação. Estas três etapas fecham um ciclo que permite resolução de muitos problemas e que são bastante utilizados em sistemas de controle (CAMBOIM, 2012). Este ciclo pode ser visto pela Figura 3.4.

FIGURA 3.4 - ESQUEMA DO RACIOCÍNIO FUZZY



Visando uma melhor compreensão de todas as etapas do processo, considere o seguinte exemplo:

Seja um sistema que é controlado ajustando uma válvula de vapor de acordo com a temperatura e a pressão (TORRES, 1995).

Assumindo a definição de alguns qualificadores para uma variável rotulada “temperatura”, tem-se: “negativo grande” (NG), “negativo médio” (NM), “zero” (Z), “positivo pequeno” (PP), “positivo médio” (PM) e “positivo grande” (PG).

Por simplicidade, são utilizadas apenas quatro regras fuzzy que combinam as funções de pertinência das variáveis de entrada do processo (temperatura e pressão) com as ações de controle sobre a válvula. Dessa forma, obtêm-se:

R1- **SE** Temperatura é **Fria** **E** Pressão é **Muito Baixa**  
**ENTÃO** Ação da válvula é **PG**.

R2- **SE** Temperatura é **Fria** **E** Pressão é **Baixa**  
**ENTÃO** Ação da válvula é **PM**.

R3- **SE** Temperatura é **Fria** **E** Pressão é **Correta**  
**ENTÃO** Ação da válvula é **Z**.

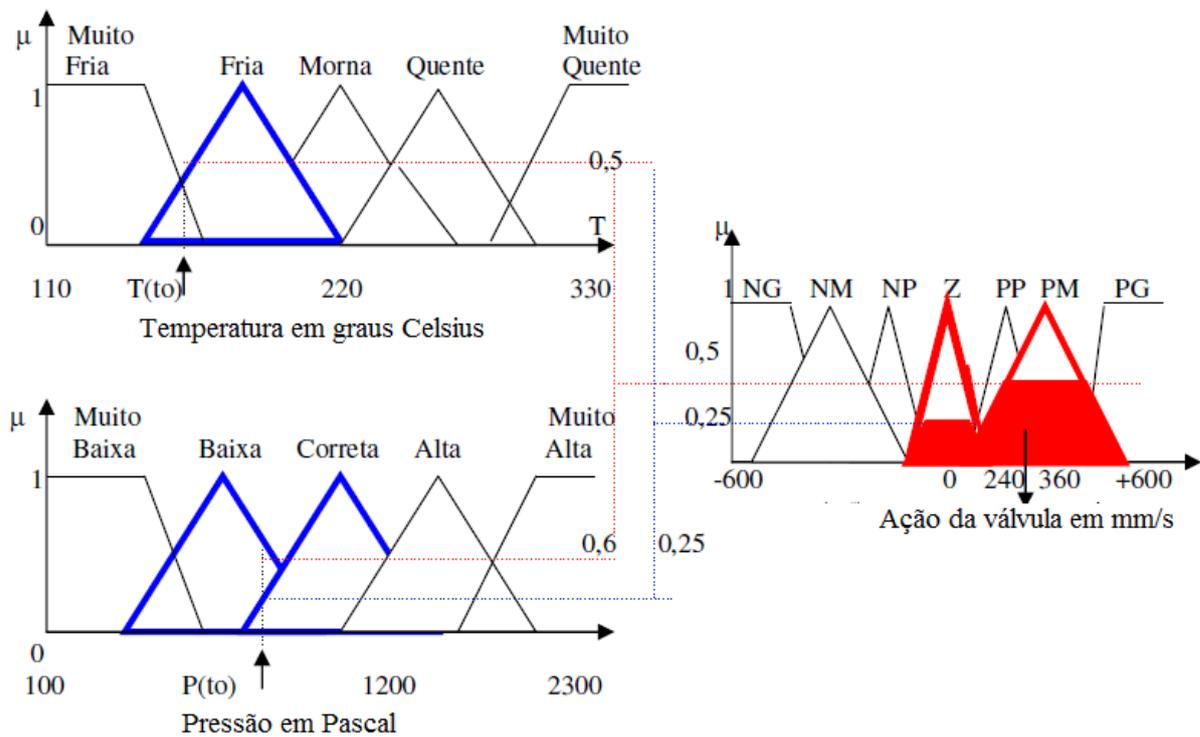
R4- **SE** Temperatura é **Fria** **E** Pressão é **Alta**  
**ENTÃO** Ação da válvula é **NM**.

A inferência fuzzy converte o conhecimento contido nas regras em um valor preciso do posicionamento da válvula de vapor.

Tendo como base apenas as quatro regras apresentadas, admita que em um determinado instante  $t_0$  os sensores do processo indiquem uma temperatura  $T(t_0)$  e uma pressão  $P(t_0)$  conforme mostrada na Figura 16. Então a variável  $T$ , neste instante, ativaria apenas a função de pertinência **Fria** com grau de pertinência **0,5**. Por outro lado a variável  $P$  possui grau de pertinência em dois subconjuntos fuzzy: **Baixa** (com grau de pertinência **0,6**) e **Correta** (com grau de pertinência **0,25**). A atividade de atribuir os graus de pertinência (variando em um intervalo  $0 \leq \mu \leq 1$ ) é denominada fuzzificação (já descrita em seções anteriores). Dessa forma, estas

duas entradas ativam, no tempo  $t_0$ , as regras 2 e 3 como conforme mostrada na Figura 3.5.

FIGURA 3.5 – DETERMINAÇÃO DO PROCESSO DE DEFUZZIFICAÇÃO BASEADA NAS REGRAS ATIVAS.



Para cada conexão **E** entre as funções de pertinência da premissa utiliza-se, por exemplo, o operador **mínimo** (tipo de inferência associado a conexão E) para se obter o resultado que ativa as funções de pertinência do domínio de saída: **0,5** (mínimo entre 0,5 e 0,6) para a segunda regra (R2) e **0,25** (mínimo entre **0,25** e **0,5**) para a terceira (R3). Por estas duas regras, as funções de pertinência da saída ativadas são: a **PM** (assumindo o grau de pertinência **0,5**) e **Z** (assumindo o grau de pertinência **0,25**). Em seguida, essas duas regras são combinadas. Esta combinação produz uma função de pertinência para o domínio da saída que é então inferida através da técnica de defuzzificação (já descrita em seções anteriores).

Existem diversas técnicas para realizar o processo de defuzzificação [19]. Neste exemplo é utilizado o **Centroide** (centro de máximo). No método de defuzzificação Centroide, os picos das funções de pertinência são representados no

universo de discurso da variável de saída. Os valores não nulos do vetor de possibilidade de saída são posicionados nos picos correspondentes, assumindo que representam pesos. O valor de saída defuzzificado, discreto, é determinado encontrando-se o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência. Dessa forma:

$$\text{Ação da válvula} = \frac{(0,25 \times 0 \frac{mm}{s}) + (0,5 \times 360 \text{ mm/s})}{0,25 + 0,5} = 240 \text{ mm/s}$$

em que o centro da função PM = 360 mm/s e o centro da função Z = 0 mm/s.

O valor obtido com o processo de defuzzificação (240 mm/s) será a resposta da válvula (velocidade de abertura ou fechamento) para atender as regras estabelecidas (do controlador) promovendo uma maior eficiência de resposta. É importante observar que a cada instante os sensores coletam outros pares de valores ( $T$  e  $P$ ) e o controlador, então, recalcula as novas ações de saída.

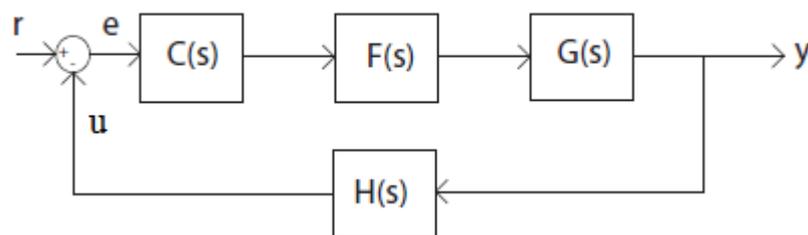
**4 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SELEÇÃO  
NEGATIVA EM UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE  
ÁGUA QUE UTILIZA CONTROLE FUZZY**

#### 4 APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA EM UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA QUE UTILIZA CONTROLE FUZZY

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde os tempos remotos. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem, e ainda presente em muitos processos, apresenta a necessidade de um operador humano que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade. Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos. Isto foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico, que dentre os diversos conhecimentos nos trouxe as teorias clássicas de controle.

Os sistemas de controle são utilizados para garantir a operação do processo em condições desejáveis de segurança e eficiência. Esses sistemas, genericamente, possuem a configuração apresentada na Figura 4.1 em que **C** representa o controlador, **F** o atuador, **G** o processo a ser controlado e **H** a estrutura de instrumentação/sensor associada (composta por sensores e meios de transmissão de sinal). O sinal **y** representa a variável de processo a ser controlada ou variável controlada, **r** o sinal de referência (*setpoint*) para o controlador, o sinal **e** corresponde ao erro e **u** a variável manipulada ao sinal de controle associado (TAVARES, 2008).

FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA DE CONTROLE.



Todos os componentes observados na Figura 4.1 estão sujeitos a falhas devido a diversos fatores, dentre os quais podem ser: fadiga, falta de manutenção, especificação incorreta, instalação ou operação realizada de maneira inadequada. Um sistema automático de monitoramento de falhas deve ser capaz de detectar

estas anormalidades. Como podem ser vários os tipos e as formas de falhas atuantes em sistemas de controle, neste trabalho, somente algumas falhas serão associadas ao sistema de bombeamento e abastecimento de água controlado através da lógica fuzzy.

#### 4.1 FALHAS EM ATUADORES

Existem diversos dispositivos que podem ser considerados atuadores em um sistema de controle industrial: válvulas, motores, bombas dentre outros.

As válvulas, aqui analisadas, são utilizadas para controlar vazão e pressão e estão entre os principais atuadores utilizados na indústria. As válvulas podem apresentar um comportamento não linear indesejado devido à ocorrência de *stiction* (efeito em que a válvula responde apenas quando o sinal de controle associado a ela é grande o suficiente para vencer a fricção ao qual este dispositivo pode estar apresentado) (TAVARES, 2008). Outro comportamento anormal considerado pode ocorrer quando há uma variação brusca (abertura ou fechamento) da válvula, alterando seu comportamento de funcionamento no sistema. Esta será a condição de anormalidade inserida, neste dispositivo, como perturbação na planta.

#### 4.2 PLATAFORMA EXPERIMENTAL DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO CONTROLADORES BASEADOS NA LÓGICA FUZZY

Nesta etapa apresenta-se uma breve descrição dos experimentos realizados na pesquisa, bem como todos os equipamentos e técnicas utilizadas no seu desenvolvimento.

Os experimentos foram divididos em três módulos: no primeiro as perturbações do sistema ficavam por conta de um emulador de demanda, que causava perturbações lentas no sistema semelhante à variação de demanda de um sistema real. É nesta etapa que ocorreu a coleta dos dados próprios a serem inseridos no algoritmo proposto (mediante simulações). O segundo módulo consistiu na inserção de perturbações críticas no sistema, causando altas variações na pressão. Nesta etapa foram coletados os pontos de anormalidades (não-próprios) e é neste contexto que o algoritmo de seleção negativa é capaz de detectar as falhas inseridas no sistema (mediante simulações). No terceiro e último módulo o ASN foi

capaz de detectar, na planta física, utilizando uma interface desenvolvida no programa computacional LABVIEW™, as anormalidades inseridas, fisicamente, no sistema.

#### 4.2.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA UTILIZADA

Passa-se agora, nesta seção, a descrever um breve funcionamento da plataforma experimental utilizada nesta pesquisa. Os experimentos foram realizados em uma bancada experimental compacta, previamente montada, localizada nas dependências do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS/UEPB (CAMBOIM, 2012). Esta planta é composta por diversos instrumentos para medição (sensores), instrumento para ação de controle (controlador) e instrumentos atuadores (válvulas, motores). A partir da observação e análise da planta existente, foi possível inserir falhas, e posterior, atuação do algoritmo, nesta planta. A bancada experimental é mostrada na Figura 4.2.

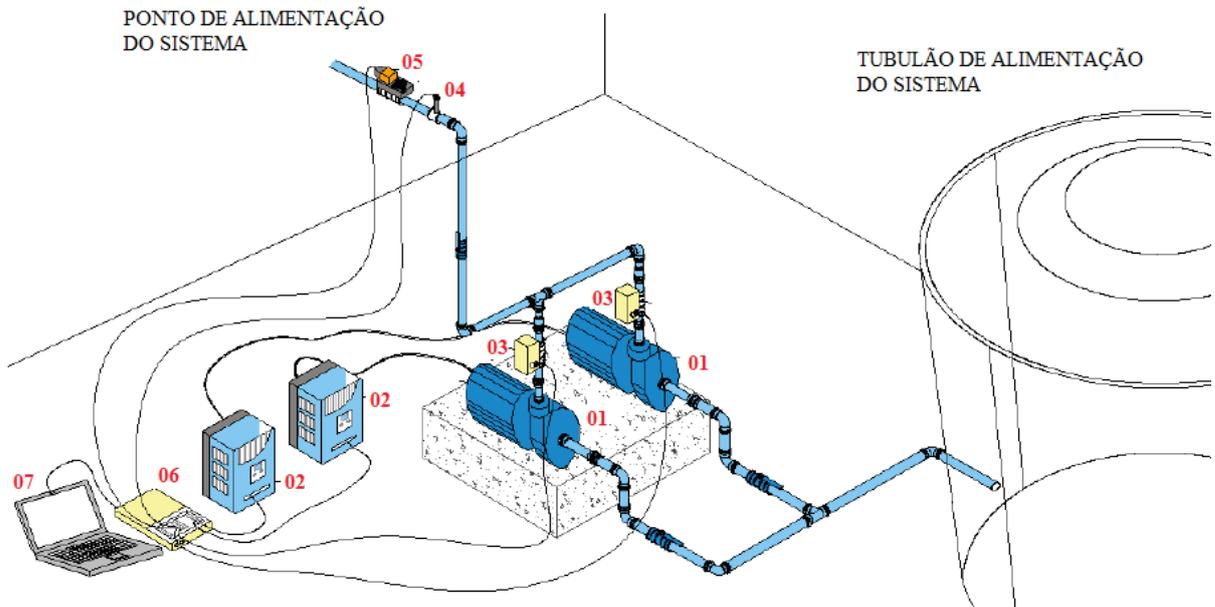
FIGURA 4.2 - BANCADA EXPERIMENTAL. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



A bancada experimental emula um sistema de abastecimento real com todos os componentes necessários para o seu bom funcionamento. Por se tratar de um modelo experimental foi concebida como um circuito fechado, no qual seu ponto de descarga (ponto de consumo) possui ligação com o reservatório que abastece o sistema. O sistema é composto por dois conjuntos motor-bomba (operando em paralelo), devido a grande variação da vazão bombeada. Seu acionamento é do tipo múltiplo podendo estar ligada uma ou outra, ou as duas a qualquer instante. Também existe a possibilidade de “acionamento parcial”, com variação da velocidade de rotação de cada conjunto motor-bomba, devido a utilização de conversores de frequência. O controlador fuzzy atuará, principalmente, nos instantes de maior consumo, onde normalmente a utilização de um conjunto motor-bomba é insuficiente (evidentemente para grandes sistemas), sendo necessário o acionamento, em paralelo, do segundo conjuntos motor-bomba. Essa necessidade, juntamente com a possibilidade da utilização de conversores de frequência, possibilita obter inúmeras combinações de velocidade de rotações dos motores envolvidos no bombeamento. A lógica de controle computacional (fuzzy) terá como objetivo escolher aquele que proporcione o menor consumo energético e o melhor nível de rendimentos dos conjuntos sem, contudo, abdicar de manter a pressão do sistema constante e em níveis aceitáveis (CAMBOIM, 2012).

Na Figura 4.3 é apresentado o diagrama esquemático da montagem da bancada, que é composta por um reservatório (tubulão de alimentação do sistema), dois conjuntos motor-bomba (ver índice 01 da Figura 4.3), dois inversores de frequência (ver índice 02 da Figura 4.3), dois medidores de vazão (ver índice 03), sensores de pressão (ver índice 04), uma válvula de controle (ver índice 05), uma fonte de alimentação, uma interface de aquisição de dados (IAD, ver índice 06) e um computador portátil (no qual estão inseridas as lógicas de controle, a interface humano-máquina desenvolvida no LabVIEW<sup>TM</sup> e a lógica do algoritmo para detecção de falhas, conforme índice 07 da Figura 4.3).

FIGURA 4.3 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA BANCADA. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



Além dos dispositivos mencionados acima, foram utilizados tubos, conexões e registros para a instalação hidráulica e cabos, disjuntores de proteção, hastes de aterramento e quadros para a alimentação elétrica. Alguns dos instrumentos (e quantidades reais relativos) utilizados são especificados a seguir.

Os 02 (dois) conjuntos motor-bomba utilizados são responsáveis pelo fornecimento de energia ao sistema de bombeamento de água na forma de vazão e pressão, conforme mostrado na Figura 4.4.

FIGURA 4.4 - CONJUNTO MOTOR-BOMBA FONTE: (CAMBOIM, 2012).



O CMB é monobloco, modelo CAM-W10, da marca Dancor, constituído de um motor de indução trifásico, 220/380 V, 60 Hz, 3 CV, isolamento classe B,

proteção IP-21, categoria N, velocidade de rotação nominal de 3450 rpm; e uma bomba centrífuga, monoestágio, com altura de sucção máxima inicial de 6 mca, diâmetro do rotor de 162 mm, altura manométrica máxima de 45 mca e vazão máxima de 12 m<sup>3</sup>/h.

Os 02 (dois) inversores de frequência utilizados foram o CFW-11 da WEG. Possuem uma tensão de alimentação de 380 a 480 Vca trifásica, com corrente nominal de saída de 16 A. A sua função é acionar os motores elétricos e trazer a possibilidade de funcioná-los com velocidade de rotação variável. O inversor de frequência CFW-11 dispõe de uma interface humano máquina, na qual são configuradas todas as características necessárias ao seu funcionamento (tempo de aceleração e desaceleração, entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas, etc). Este equipamento é mostrado na Figura 4.5.

FIGURA 4.5 - INVERSOR DE FREQUÊNCIA. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



Os 02 (dois) medidores de vazão eletromagnéticos utilizados tiveram como objetivo informar sobre o comportamento da demanda hidráulica do sistema em detrimento da vazão. Foram instalados equipamentos na saída de cada conjunto motor-bomba para obter-se a vazão de um conjunto ou do sistema representado pela soma das duas vazões. O equipamento é da marca Incontrol, série VMS, modelo VMS 038. Sua alimentação se dá por meio de uma tensão de 24Vcc, enquanto o sinal de saída é transmitido em corrente na faixa de 4 a 20mA, sendo 4 mA para o limite inferior da faixa de medição e 20 mA para o limite superior, o que corresponde a um intervalo de medição de vazão (linear) de 1,24 a 40,8 m<sup>3</sup>/h. Este tipo de instrumento é mostrado na Figura 4.6.

FIGURA 4.6 - MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



Foram utilizados 05 (cinco) medidores de pressão na planta: um localizado antes e outro após o conjunto motor-bomba CMB-01 (principal), um sensor localizado antes e outro após o conjunto motor-bomba CMB-02 (auxiliar), também com o objetivo de obter as características (curvas) do sistema. Até então foram utilizados 04 (quatro) sensores. Além dos citados, também foi instalado um medidor de pressão no ponto final da rede, local onde se pretende controlar a pressão, denominado de ponto de consumo da instalação.

Os 05 (cinco) transdutores de pressão totais utilizados foram da marca DRUCK, modelo PTX7217, com faixa de medição entre 0 e 60 psi. Cada sensor é do tipo piezo-resistivo de silício e o sinal de saída é de 4 a 20 mA, sendo 4 mA sua menor pressão registrada e 20 mA a maior. O tempo de resposta é 1 milissegundo, a precisão de  $\pm 0,2\%$  e a tensão de alimentação de 24 Vcc. Este tipo de instrumento é mostrado na Figura 4.7.

FIGURA 4.7 - MEDIDOR DE PRESSÃO. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



A válvula de controle proporcional (VCP) tem a função de controlar o fluxo, variando a demanda de vazão do sistema. Através dela simulou-se a abertura e fechamento do sistema, para obter, conseqüentemente, uma maior ou menor demanda de água.

A válvula de controle proporcional, instalada a jusante do medidor de pressão, não faz parte diretamente do controle, ela funciona como um instrumento perturbador que vai impor mudanças nas condições de operação do sistema e cujas perturbações servirão de dados de entrada para serem utilizados pelo ASN. A válvula utilizada é do tipo esfera acionada por um motor elétrico com tensão de alimentação de  $24\text{ Vcc} \pm 10\%$  e torque de  $20\text{Nm}$ . O ângulo de abertura varia de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (podendo também ser ajustado manualmente) sendo a pressão máxima de operação de  $140,62\text{ mca}$ . Este tipo de instrumento é mostrado na Figura 4.8.

FIGURA 4.8 - VÁLVULA DE CONTROLE PROPORCIONAL. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



O controle da válvula é realizado por meio de um sinal de tensão de 2 a 10 Vcc (enviado a partir da lógica fuzzy associada ao controlador), sendo 2 Vcc para a válvula totalmente fechada e 10 Vcc para a válvula totalmente aberta (variação linear). Para valores intermediários a válvula assume posições intermediárias. Juntamente com a alimentação e os sinais de comando é transmitido um sinal indicador do estado atual de abertura da válvula (também na forma de tensão de 2 a 10 Vcc), visto que a válvula movimenta-se de forma lenta (o ciclo completo de fechamento *versus* abertura dura 90 segundos).

A interface de aquisição de dados recebe e transmite o sinal dos equipamentos para um computador no qual está inserida a Interface-Humano-Máquina (desenvolvida no ambiente computacional LABVIEW™). Foi utilizado o módulo de aquisição de dados (DAQ) do fabricante *National Instruments* NI-USB 6229. Este dispositivo possui 32 entradas e 4 saídas analógicas, com taxa de transferência de  $1,25\text{ Mb/s}$  para as entradas e de  $2,86\text{ Mb/s}$  para as saídas, sendo que as tensões elétricas em seu comportamento variam entre  $-10$  e  $+10\text{ Vcc}$ . Foi

utilizada uma taxa de amostragem de 1 kHz e 1000 amostras (contínuas)/canal. Este tipo de equipamento é mostrado na Figura 4.9.

FIGURA 4.9 - INTERFACE DE AQUISIÇÃO DE DADOS. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



Ao todo foram utilizadas dez entradas analógicas referentes aos sensores de pressão, medidores de vazão, válvula proporcional e aos conversores de frequência. E ainda três saídas analógicas para o comando da válvula de controle e os comandos dos inversores de frequência.

#### 4.2.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

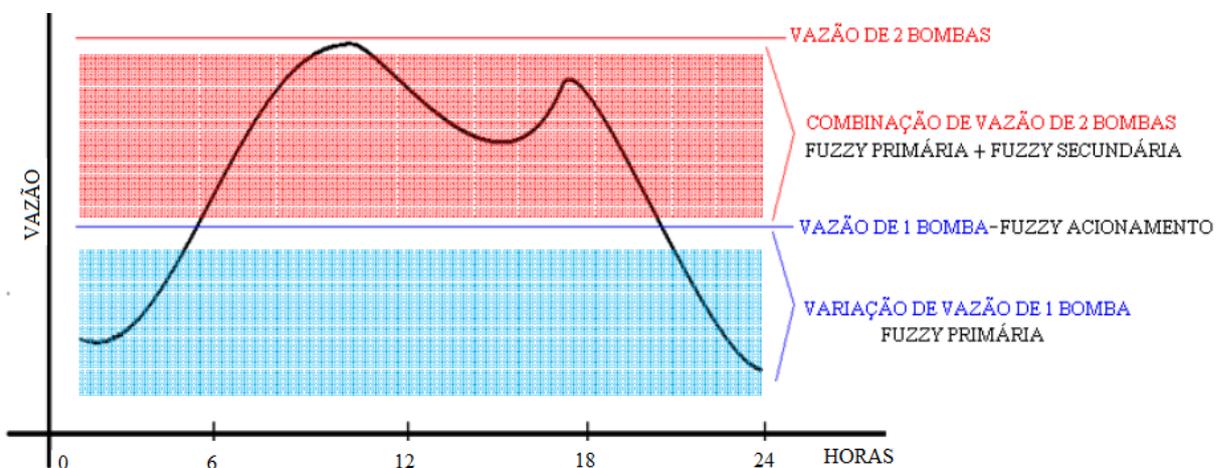
O algoritmo de seleção negativa foi implementado no ambiente computacional MATLAB® (versão 7.14.0.739 – R2012a) e a interface para monitoramento, na planta física, foi implementado na ferramenta computacional LabVIEW™ 2012. Ambos sendo executados em um computador com o Sistema Operacional Windows 7 (Microsoft) com 4 GB de memória RAM e processador Intel Core i7.

#### 4.2.3 CONTROLADORES FUZZY

Para o sistema de controle estabelecido foram utilizados três controladores Fuzzy: um responsável pelo acionamento do conjunto motor-bomba principal (CMB-01), denominado **Fuzzy Principal**, o segundo responsável pelo acionamento do conjunto motor-bomba secundário (CMB-02), denominado **Fuzzy Secundário** e o terceiro responsável por definir o instante em que o conjunto motor-bomba deverá ser acionado, denominado **Fuzzy Acionamento**.

O controlador Fuzzy Primário está envolvido em todo o processo de bombeamento, seja nos períodos de menor vazão requerida (conforme é mostrado na Figura 4.10), em que é necessário apenas o acionamento de um conjunto motor-bomba (economizando energia) ou nos períodos de maior consumo, onde será necessário o funcionamento dos dois conjuntos motor-bomba, para suprir toda vazão requerida pelo sistema (conforme é mostrado na Figura 4.10).

FIGURA 4.10 - CURVA DE DEMANDA DO SISTEMA COM COMBINAÇÃO DE ATUAÇÃO DOS CONTROLADORES. FONTE: (CAMBOIM, 2012).



Apesar de estar presente em todo o processo, o controlador Fuzzy Primário possui a função de controlar apenas o conjunto motor-bomba primário.

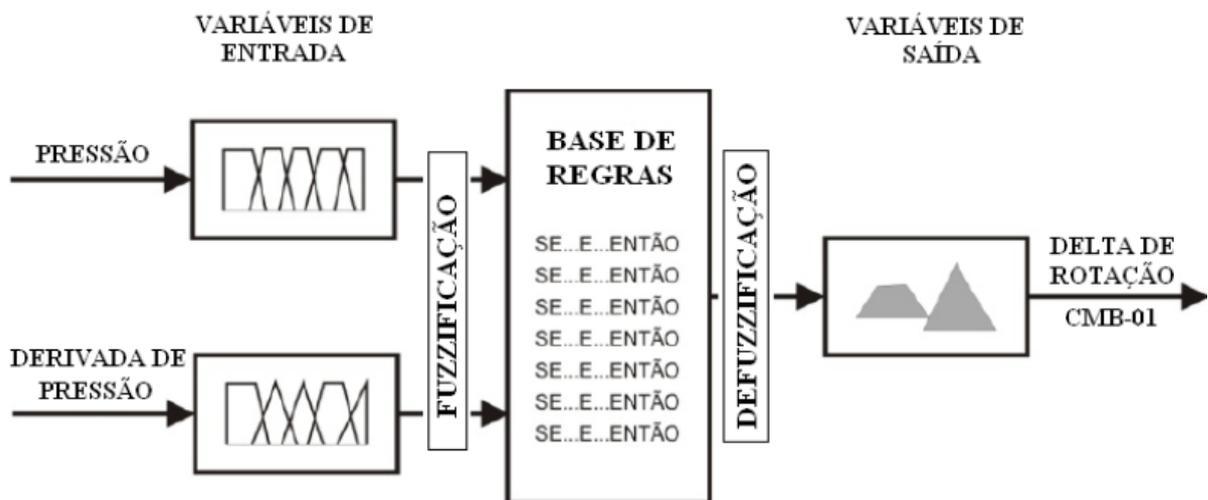
O controlador Fuzzy Secundário apenas é acionado e conseqüentemente causará também alguma influência ao controlador Fuzzy Primário somente quando a vazão demandada pelo sistema não for suprida apenas pelo CMB-01. O controle responsável por definir o momento exato em que o conjunto motor-bomba secundário deverá ser acionado é de responsabilidade do controlador Fuzzy Acionamento.

A seguir são descritas, de maneira resumida, as variáveis de entrada e de saída referentes a cada controlador utilizado. A base de regras, previamente implementada, e o processo de defuzzificação utilizados não serão descritos neste documento.

a) Controlador Fuzzy Primário.

Por meio da análise do comportamento do sistema de bombeamento foi estabelecido que o Controlador Primário possua duas **variáveis de entradas**: pressão e derivada da pressão, em que a primeira representa a pressão na rede que corresponde a variável a ser controlada e deve ser mantida no valor de 25 mca (*setpoint*) e a segunda variável representa a derivada da variável a ser controlada, a qual tende a antecipar o comportamento futuro da pressão auxiliando na retroalimentação para se antecipar as ações do sistema. O esquema básico do controlador Fuzzy principal é mostrado na Figura 4.11.

FIGURA 4.11 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY PRINCIPAL FONTE: (CAMBOIM, 2012).



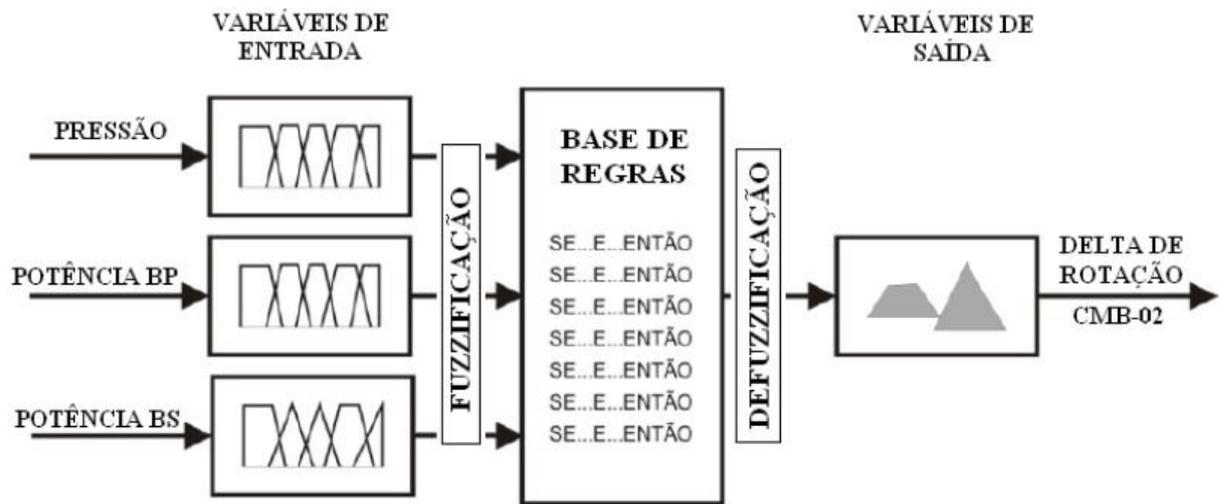
A **variável de saída** do controlador Fuzzy Primário foi definida como delta de rotação. Essa variável representa um incremento na rotação que será adicionada à condição inicial do conjunto motor-bomba primário (CMB-01).

b) Controlador Fuzzy Secundário

O controlador Fuzzy Secundário é responsável por controlar a velocidade de rotação do segundo conjunto motor-bomba, que será acionado nos momentos de maiores demandas de vazão. Também é sua função gerenciar o consumo

energético do sistema e fazê-lo operar nas melhores condições. Para isso foram selecionadas como **variáveis de entradas**, além da pressão do sistema, a potência do conjunto motor-bomba primário (BP) e a potência do conjunto motor-bomba secundário (BS). O esquema básico do controlador Fuzzy secundário é mostrado na Figura 4.12.

FIGURA 4.12 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY SECUNDÁRIO FONTE: (CAMBOIM, 2012).



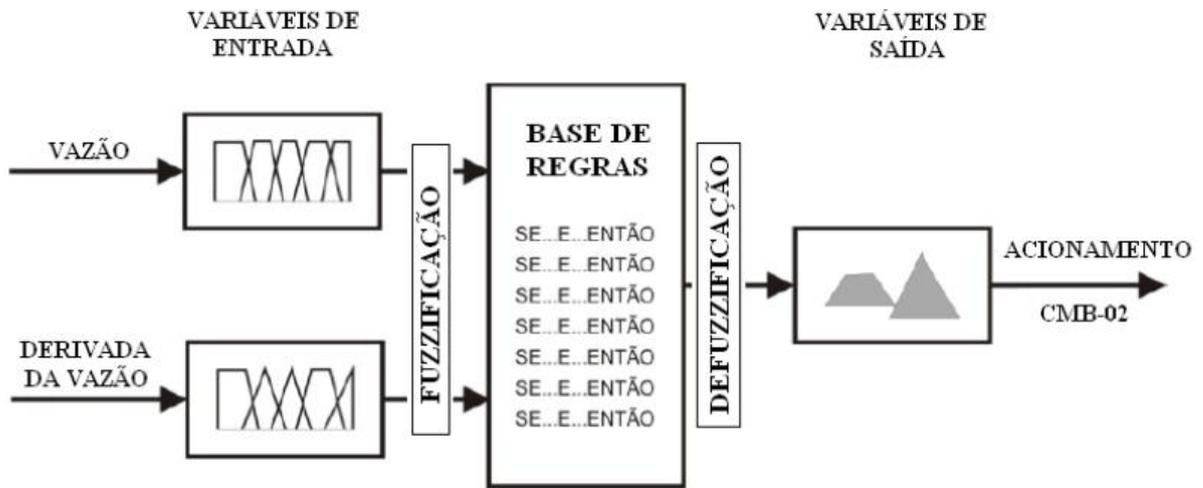
Para a variável de saída deste controlador foi utilizada uma variável denominada delta de rotação. Essa variável representa um incremento na velocidade de rotação que será adicionada à condição atual de operação do conjunto motor-bomba secundário (CMB-02). O Delta de Rotação pode assumir valores negativos ou positivos e com isso terá a possibilidade de aumentar ou diminuir a velocidade de rotação do motor, conforme a necessidade de pressão, vazão e consumo energético do sistema.

### c) Controlador Fuzzy Aacionamento

Foram atribuídas duas **variáveis de entrada** para este controlador: vazão e derivada da vazão. Essas variáveis foram escolhidas uma vez que cada conjunto motor-bomba possui um limite de vazão máxima, que deverá ser suprida pelo outro no momento oportuno, a fim de atender a demanda requerida pelo sistema de

abastecimento. Com a utilização dos inversores de frequência esse instante pode ser antecipado ou retardado dependendo da necessidade. A derivada da vazão possibilitará o conhecimento da tendência ou projeção da variável vazão, auxiliando no processo de decisão. O esquema básico do controlador Fuzzy acionamento é mostrado na Figura 4.13.

FIGURA 4.13 - ESQUEMA BÁSICO DO CONTROLADOR FUZZY ACIONAMENTO FONTE: (CAMBOIM, 2012).



A **variável de saída** desse controlador Fuzzy é a resposta ao acionamento ou desacionamento do conjunto motor-bomba secundário.

### 4.3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

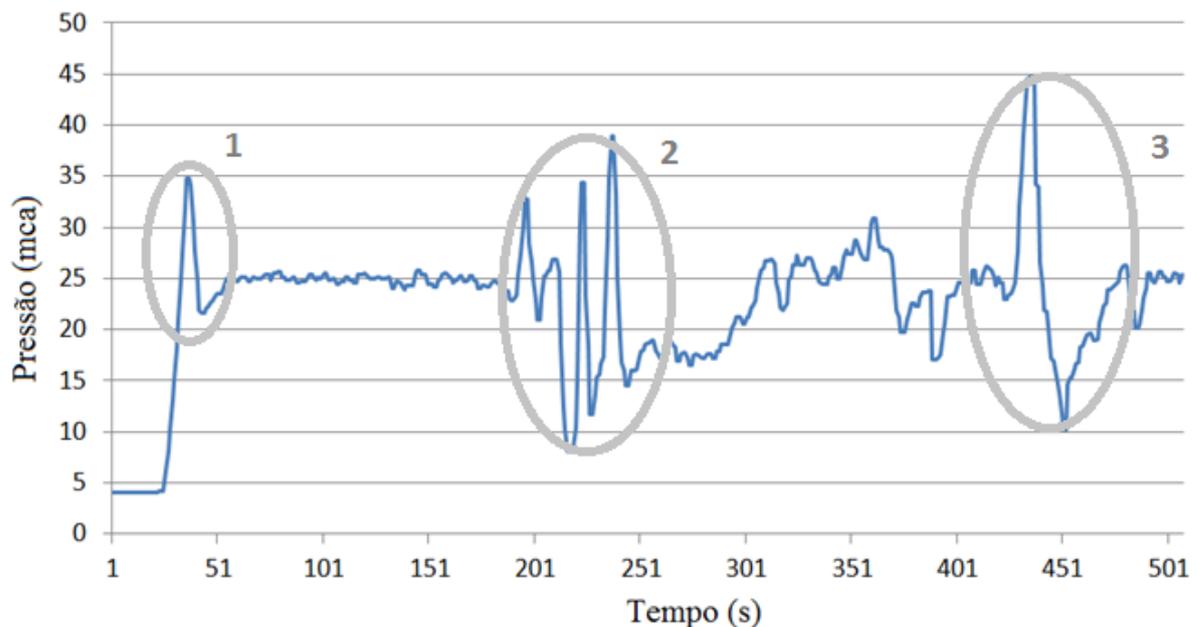
Foram realizados, nesta primeira etapa, 02 (dois) experimentos com a finalidade de coletar os pontos de pressão, resultantes das curvas obtidas. Estes pontos servirão como dados de entrada para o algoritmo. Em relação aos experimentos propriamente ditos, a planta emula o abastecimento de uma rede de distribuição bem como as possíveis interferências que podem ocorrer neste tipo de sistema. O objetivo do controlador fuzzy utilizado foi manter a pressão do sistema constante em 25 mca (*setpoint*), utilizando os dois conjuntos motor-bomba apenas quando necessários. Isto promove uma maior eficiência energética ao sistema.

A seguir é descrito, de maneira detalhada, cada um dos experimentos realizados.

#### 4.3.1 EXPERIMENTO 01: Sistema com Variação de Demanda com Atuação do Controlador Fuzzy

Neste experimento, o sistema foi submetido a variações de pressão com o objetivo de emular a demanda de consumo em uma situação real e promover o levantamento dos pontos da curva de pressão, considerada como funcionamento normal do sistema, mantendo seu valor de referência previamente especificado. Estes pontos são denominados de próprios, relacionados ao algoritmo proposto neste trabalho e servirão de dados de entrada (no MATLAB®) para o ASN. Foram realizados aberturas e fechamentos das válvulas (VCP e manual) de maneira gradual e com oscilações controladas a fim de obter variações de pressão. Estas ações emulam a situação de consumo por parte dos usuários interligados à rede de abastecimento e consumo de água (aberturas de torneiras, fechamentos de registros etc). Neste momento, os conjuntos motor-bomba sofreram a ação do Controlador Fuzzy, fornecendo à rede de abastecimento apenas a pressão desejada (25 mca) não comprometendo a vazão no sistema. O resultado referente à curva de pressão é mostrado na Figura 4.14.

FIGURA 4.14 - CURVA DE PRESSÃO EM SITUAÇÃO DE FUNCIONAMENTO NORMAL DO SISTEMA



A Região 1 da curva corresponde ao instante de funcionamento inicial do sistema. Após uma subida elevada da pressão (*overshoot*) o sistema tende a

estabilização objetivando permanecer em seu valor de *setpoint* (25 mca). A Região 2 corresponde a abertura e fechamentos sucessivos (de maneira controlada) da válvula manual e da VCP localizadas no ponto de consumo da instalação emulando o consumo de usuários em um sistema de distribuição de água (fechamentos de torneiras, aberturas de registros etc). A Região 3 indica uma situação de fechamento e aberturas totais da válvula manual e VCP a fim de conferir que o controlador fuzzy trabalhe em seu limite máximo de funcionamento normal. As demais regiões da curva correspondem a estabilização e em oscilações de pressão controladas, de maneira mais suave.

Neste contexto, o CMB-Principal faz parte de um sistema com injeção direta na rede do sistema, ou seja, ele funcionou durante todo o período desse experimento. O CMB-Secundário é acionado apenas nos períodos em que a vazão (e conseqüentemente a pressão) requerida não puder ser suprida apenas pelo CMB-Principal (nos demais casos há economia de energia). Ambos os conjuntos são acionados conforme decisão do controlador Fuzzy. Outro ponto a ser observado é o início do valor de pressão (iniciando em 4 mca e não zero). Isso se deve a existência prévia de água nas tubulações antes da atuação dos conjuntos motores-bombas.

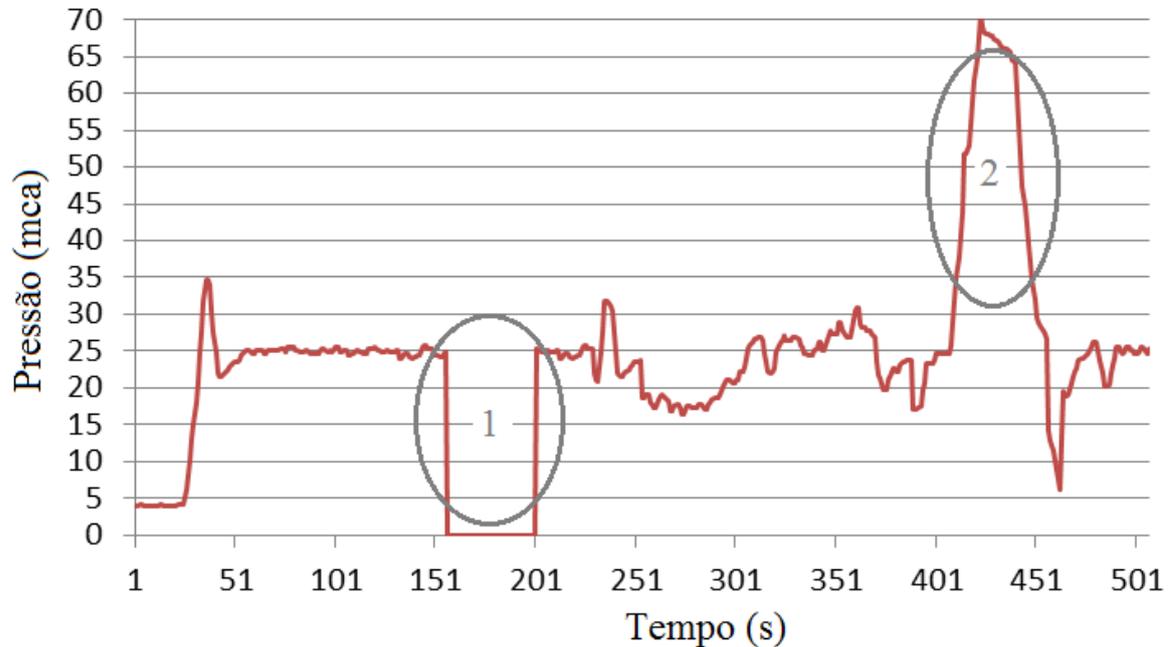
Os pontos, referentes aos valores de pressão, obtidos a partir da curva de funcionamento normal do sistema (conforme é mostrado na Figura 4.14) foram utilizados como dados do ASN. Faz-se necessário, pois, para ocorrer à detecção de falhas em sistemas de controle, o ASN necessita de dados que descrevam as condições de operação normal do sistema a fim de ser possível gerar os detectores que irão detectar situações em condições de operação anormais.

#### 4.3.2 Características de desempenho do sistema submetido a perturbações.

O experimento a seguir teve como objetivo promover a coleta dos pontos considerados como falhas (não-próprios) para serem inseridos no ASN. Para isso, foram introduzidos distúrbios na planta da rede de abastecimento através do desligamento (via energização) de alguns elementos pertencentes ao sistema (motores-bomba, VCP, sensores de pressão etc). Dessa forma, o sistema partiu do repouso a fim de alcançar a pressão considerada ótima de operação de 25 mca e após a estabilização (e variações consideradas normais) foi submetido a

perturbações que comprometeram todo o funcionamento do sistema. A curva de respostas é mostrada na Figura 4.15.

FIGURA 4.15 - CURVA DE PRESSÃO ACRESCIDA DE ANORMALIDADES



A Região 1 da Figura 4.15 mostra a primeira perturbação inserida: a perda de comunicação do sensor de pressão (localizado no ponto de consumo da instalação) com o DAQ. Para simular este comportamento indesejável no sistema, foi desligada a alimentação do sensor correspondente. Quando foi restabelecida a alimentação deste dispositivo, o mesmo continuou a efetuar a leitura de pressão.

O segundo distúrbio (Região 2 da Figura 4.15) refere-se a um aumento crítico da pressão no sistema, mediante fechamentos totais das válvulas VCP e manuais existentes. Após normalização dessa perturbação, o sistema voltou a funcionar de maneira satisfatória. Dessa forma, os pontos coletados a partir deste experimento servirão de dados para simulação do ASN e sua posterior avaliação.

#### 4.4 PROCEDIMENTOS PARA O TESTE DO ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

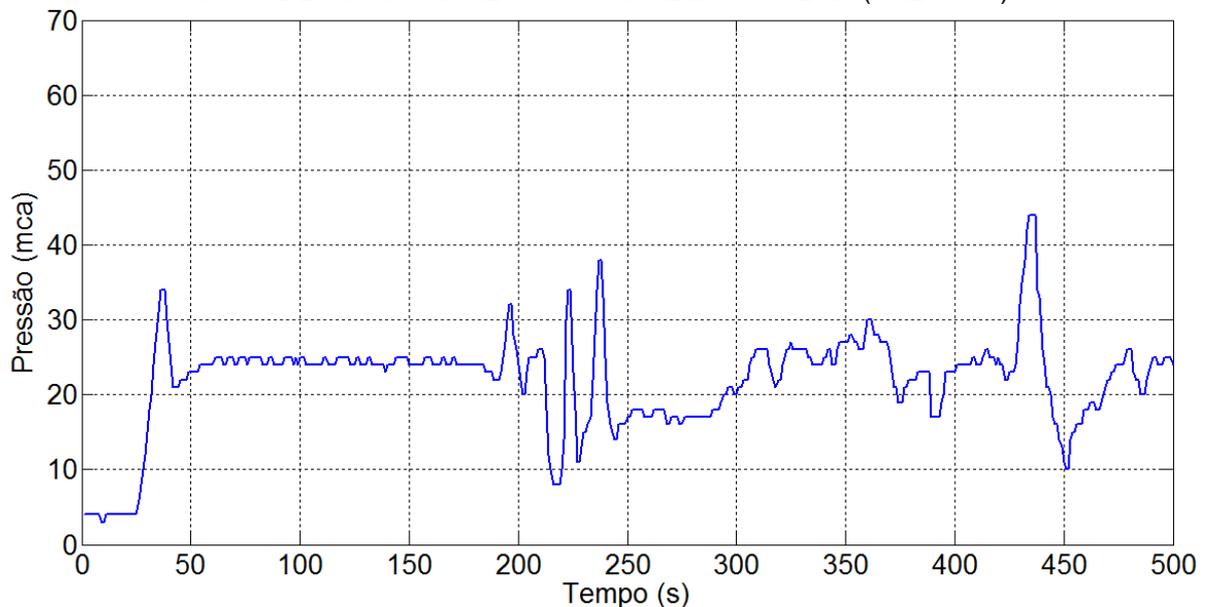
Inicialmente, foram coletados 500 (quinhentos) pontos da curva de pressão (curva de funcionamento normal do sistema) a partir dos experimentos realizados

(descritos na seção anterior). Cada um desses pontos coletados possuía uma correlação unívoca entre o eixo horizontal (correspondente ao tempo, 500s) e ao eixo vertical (correspondente à pressão do sistema). Esses pontos coletados são denominados de Vetores Próprios (*Self-String*), baseado na proposta de Forrest (FORREST, *et al*, 1994).

Candidatos a serem detectores foram gerados aleatoriamente e testados individualmente para verificar a ocorrência de casamento com algum vetor próprio. Caso ocorra algum casamento entre eles esse vetor, gerado de maneira aleatória, é descartado. Esse processo de comparação, baseado em critérios de casamento é repetido até que uma quantidade determinada de número de detectores previamente informado seja alcançada. Nesta etapa, a quantidade de detectores desejados foi igual a 100.

Utilizando o programa computacional MATLAB®, foi plotada a curva que descreve o funcionamento de operação normal do sistema (seguindo o padrão da curva de pressão mostrada na Figura 4.14) utilizando os pontos descritos anteriormente. A curva correspondente é mostrada na Figura 4.16.

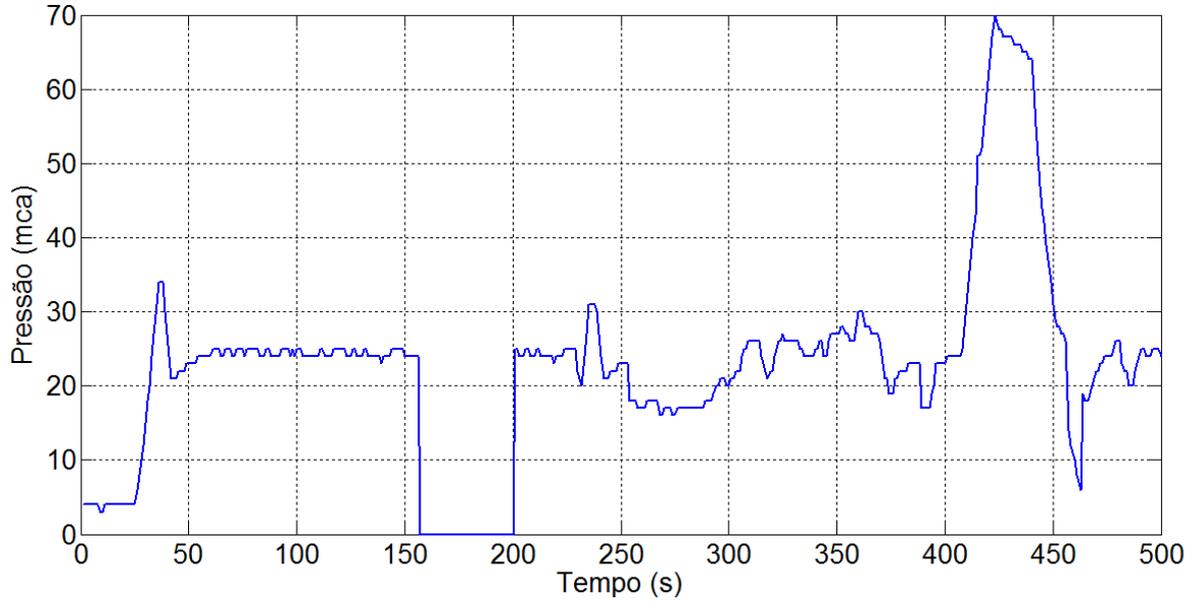
FIGURA 4.16 - CURVA DE FUNCIONAMENTO NORMAL DO SISTEMA (PRESSÃO)



Após a estabilização, o sistema foi submetido a perturbações críticas alterando seu estado de funcionamento normal (conforme já descrito na Seção 4.3.2). Dessa forma, foi plotada a curva de funcionamento normal do sistema

(acrescida dessas perturbações) após a coleta dos pontos. A curva de resposta é mostrada na Figura 4.17.

FIGURA 4.17 - CURVA DE PRESSÃO COM INTERVALOS DE FALHAS FIGURA



## **5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 SIMULAÇÕES REALIZADAS

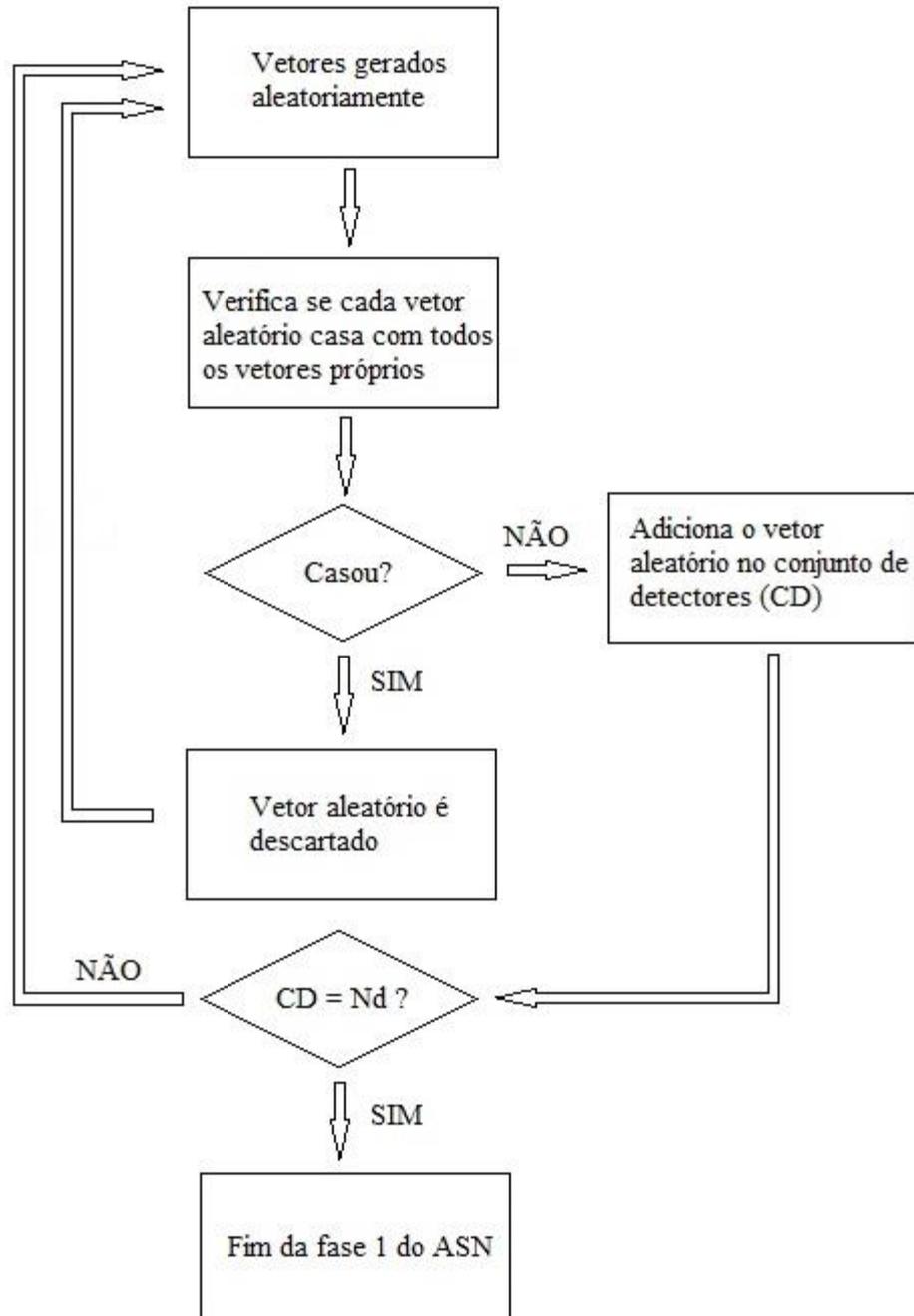
Com o objetivo de verificar a eficiência do ASN, foram realizadas algumas simulações (utilizando o critério r-hamming e utilizando o critério r-contínuos) em situações distintas: detecção de falsos positivos, detecção de intervalos (trechos) de falhas e detecção de pontos de uma curva qualquer.

Para a aplicação do algoritmo, foram considerados os seguintes passos, baseados na proposta de Forrest:

- **Definição dos conjuntos de dados próprios:** considerando os dados obtidos a partir da análise da Figura 4.16, foram realizadas amostras de 500 pontos de valores de pressão que formarão o conjunto de dados próprios  $P$ . Utilizando a técnica de **janelamento** (divisão uniforme da característica analisada em intervalos regulares), a curva de pressão foi dividida em  $n = 100$  *self-vectors* (vetores-próprios)  $\{P_1, P_2, \dots, P_{100}\}$  em que  $P_i$  corresponde a um vetor de comprimento  $l = 5$  (escolhido para facilitar a geração dos detectores pois à medida que aumenta o valor de  $l$ , há maior dificuldade computacional em formar cada vetor próprio), isto é, a cada 5 valores consecutivos de pressão forma-se um vetor-próprio;
- **Fase de Geração dos Detectores:** foram gerados 100 detectores ( $N_d = 100$ ). A quantidade de detectores foi fixa em (quase) todas as simulações e para os dois critérios utilizados (r-contínuos e r-hamming). Entretanto, o desvio  $\epsilon$  e parâmetro de casamento  $r$  foram ajustados, em cada caso, para obter os valores de maiores percentuais de cobertura de falhas, que correspondem aos valores ótimos. Estes valores serão as entradas do ASN. Os parâmetros ótimos foram alcançados mediante vários testes até serem determinados os valores em que ocorreram as maiores porcentagens de detecção de falhas inseridas dentre todos os parâmetros testados. Cada vetor, gerado de maneira aleatória, é testado com todos os vetores próprios a fim de verificar se houve casamento. Isto é realizado até que a quantidade de vetores

contidos no conjunto de detectores CD seja igual à quantidade de detectores ( $N_d$ ) previamente escolhidos. Este procedimento é baseado no fluxograma mostrado na Figura 5.1.

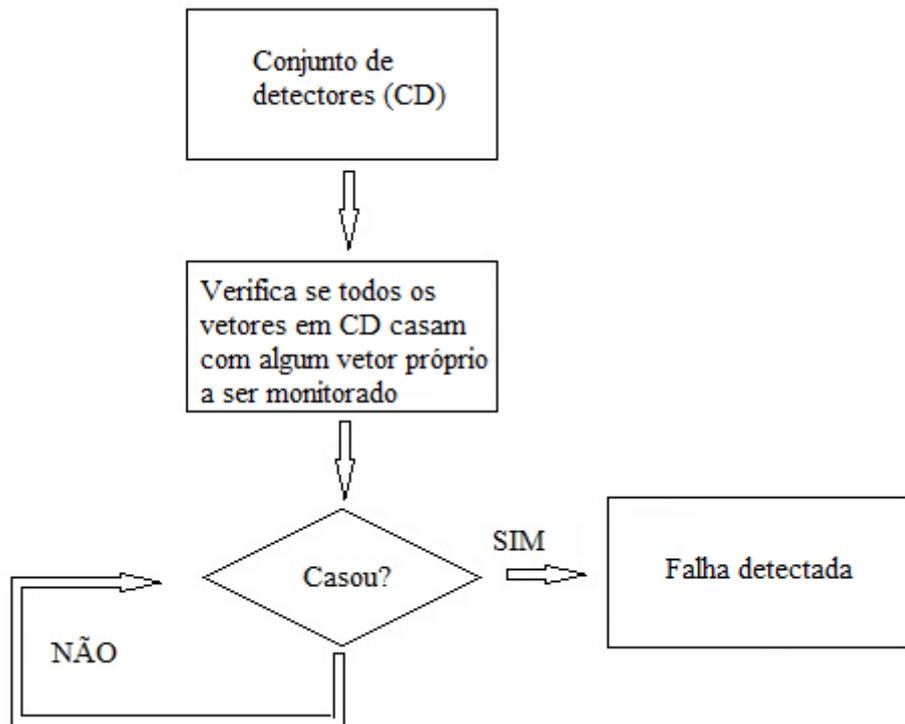
FIGURA 5.1 - FASE DE GERAÇÃO DE DETECTORES (FASE 1) PARA O ASN IMPLEMENTADO.



- **Fase de Monitoramento:** considerando a curva de pressão com algumas anormalidades presentes (conforme mostrada na Figura 4.17), essa

característica foi monitorada utilizando os detectores previamente gerados na fase anterior. Todos os detectores gerados verificam, continuamente, se existe alguma modificação em cada vetor a ser monitorado e que possa estar passível de erros. Este procedimento é baseado no fluxograma mostrado na Figura 5.2.

FIGURA 5.2 - FASE DE MONITORAMENTO (FASE 2) PARA O ALGORITMO IMPLEMENTADO.

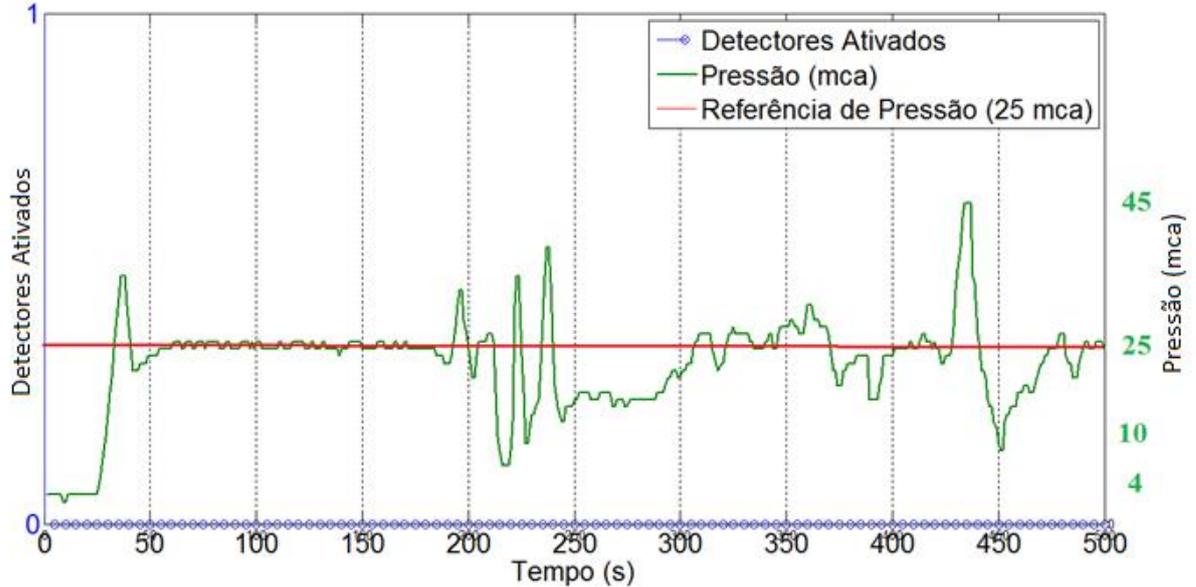


Com o objetivo de verificar a eficiência do ASN, inicialmente foram realizadas as simulações descritas a seguir:

- a) Detecção de falsos positivos (critério r-hamming):** o ASN não deve detectar situações em que pontos de funcionamento normal sejam considerados como pontos de operação de funcionamento anormal do sistema. Baseado na proposta de Forrest, o algoritmo não deve detectar os elementos próprios ao sistema. Para esta simulação foram inseridos pontos de funcionamento normal da curva de pressão (próprios) como se os mesmos fossem falhas inseridas ao sistema (não-próprios). O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.3. Para quaisquer valores de desvio  $\epsilon$  e do parâmetro de casamento  $r$  utilizados, não houve atuação de nenhum detector.

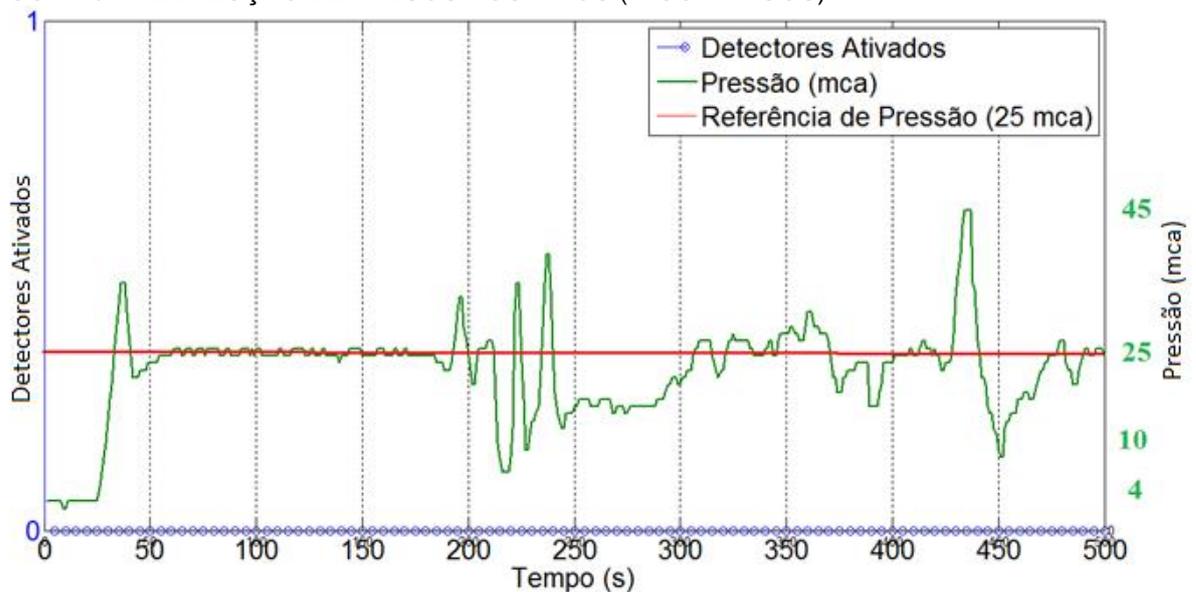
Dessa forma, observe que nenhum detector foi ativado nesta simulação, ou seja, a eficiência do ASN, nesta simulação, foi de 100%.

FIGURA 5.3 - DETECÇÃO DE FALSOS POSITIVOS (R-HAMMING)



- b) **Deteção de falsos positivos (critério r-contínuos):** foi realizada a simulação para deteção de falsos-positivos utilizando-se, também, o critério r-contínuos. Foram inseridos pontos de funcionamento normal do sistema considerando que esses pontos correspondessem a situações anormais. O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.4.

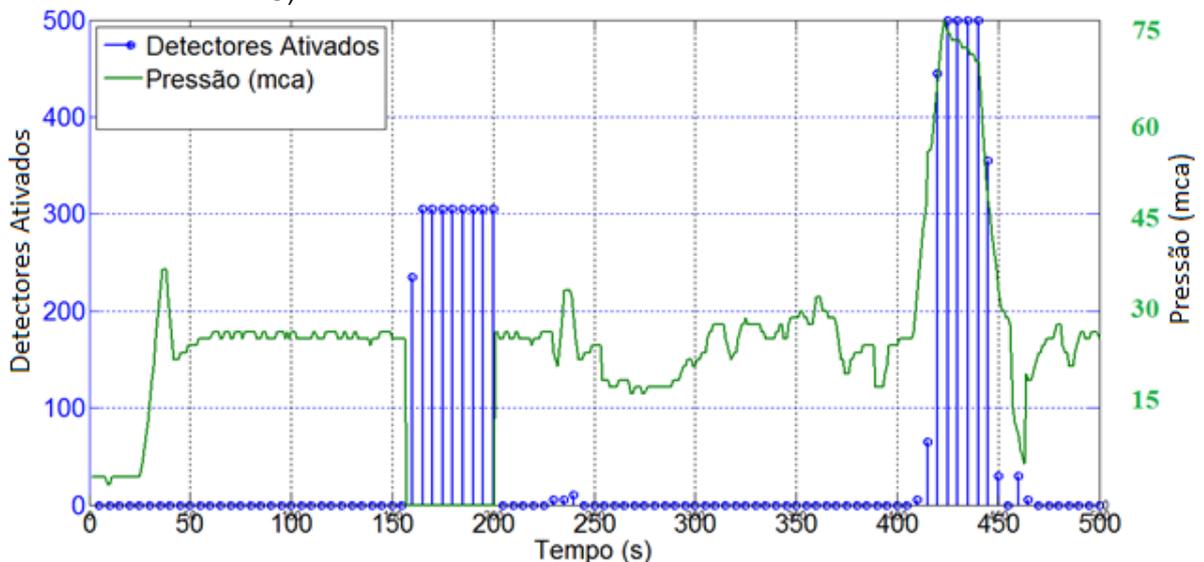
FIGURA 5.4 - DETECÇÃO DE FALSOS POSITIVOS (R-CONTÍNUOS)



Novamente, para quaisquer valores de desvio  $\epsilon$  e do parâmetro de casamento  $r$  utilizados no teste anterior, não houve atuação de nenhum detector, isto é, o ASN não detectou como anormalidade os pontos considerados de funcionamento normal do sistema, conforme era previsto.

**c) Detecção de intervalos com falhas na curva de funcionamento normal do sistema (critério r-hamming):** o ASN deverá detectar apenas os intervalos que contém as falhas inseridas ao sistema, não devendo detectar os intervalos considerados como próprios ao sistema. Dessa forma, foram inseridas falhas em determinados intervalos da curva de funcionamento normal de pressão a fim de que (apenas) estes intervalos fossem detectados pelo ASN. Estas falhas são baseadas nas anormalidades referentes à Figura 4.17. Foram utilizados, nesta simulação, um desvio  $\epsilon = 14$ ,  $r = 4$  e  $l = 5$ , que correspondem a parâmetros ótimos (obtidos após vários testes). O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.5.

FIGURA 5.5 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS NOS INTERVALOS COM ANORMALIDADES (R-HAMMING).

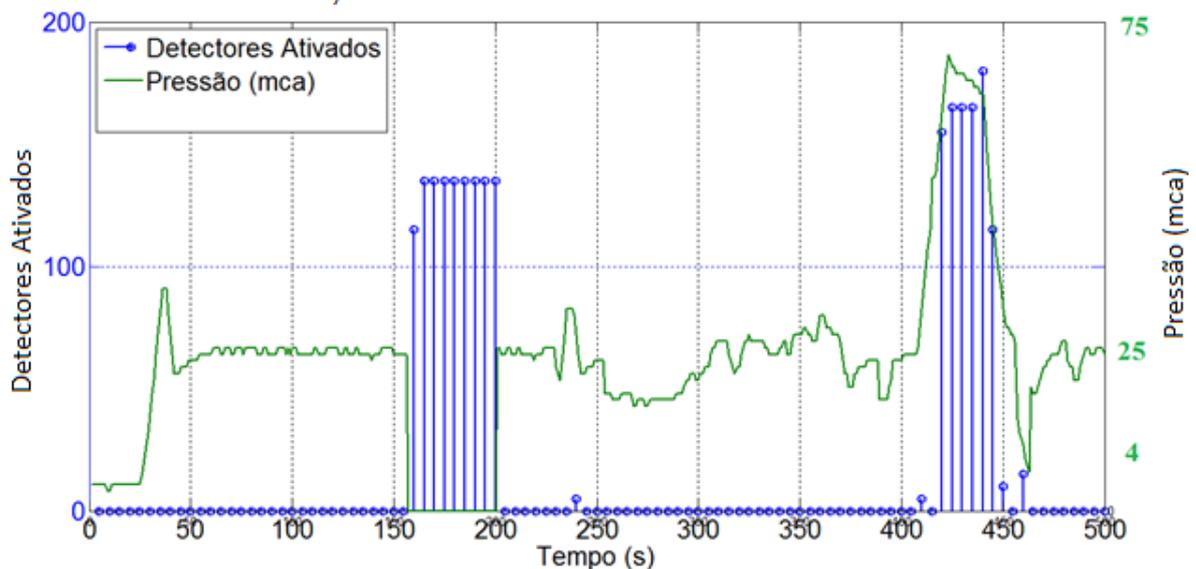


O algoritmo não detecta como anormalidade o início da curva, pois este trecho corresponde ao momento de inicialização e posterior estabilização da variável pressão. Para (apenas) os intervalos de anormalidade observa-se, agora, a presença de detectores ativados (em que um detector pode ser

acionado mais de uma vez), responsáveis pela detecção das anormalidades. A escala na cor azul (eixo vertical à esquerda) corresponde à atuação dos detectores ativados, a de cor verde representam os valores de pressão (eixo vertical à direita) e o eixo horizontal corresponde ao tempo (em segundos) associado às duas unidades citadas anteriormente.

- d) Detecção de intervalos com falhas na curva de funcionamento normal do sistema (critério r-contínuos):** foi realizada a simulação para detecção de intervalos de falhas utilizando-se, também, o critério r-contínuos. Foram utilizados, nesta simulação, um desvio  $\epsilon = 15$ , um parâmetro de casamento  $r = 4$  e o comprimento de cada vetor  $l = 5$ . O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.6 e a conclusão acerca dessa simulação é a mesma da situação anterior (r-hamming).

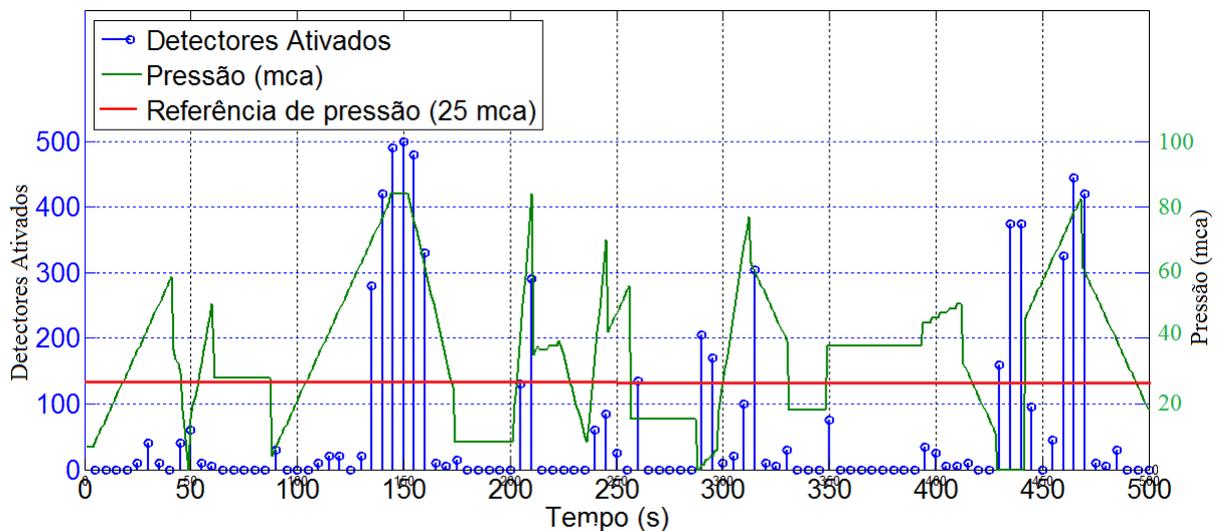
FIGURA 5.6 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS NOS INTERVALOS COM ANORMALIDADES (R-CONTÍNUOS),



- e) Detecção com pontos quaisquer (r-hamming):** foram inseridos no ASN pontos quaisquer (não correspondendo a nenhum comportamento ou teste de pressão analisado) para a verificação do algoritmo. Dessa forma, o ASN deve detectar os pontos dessa curva (que diverge em vários intervalos da curva de pressão de funcionamento normal do sistema) que forem considerados falhas. Foram utilizados, nesta simulação, um desvio  $\epsilon = 14$  e um parâmetro de

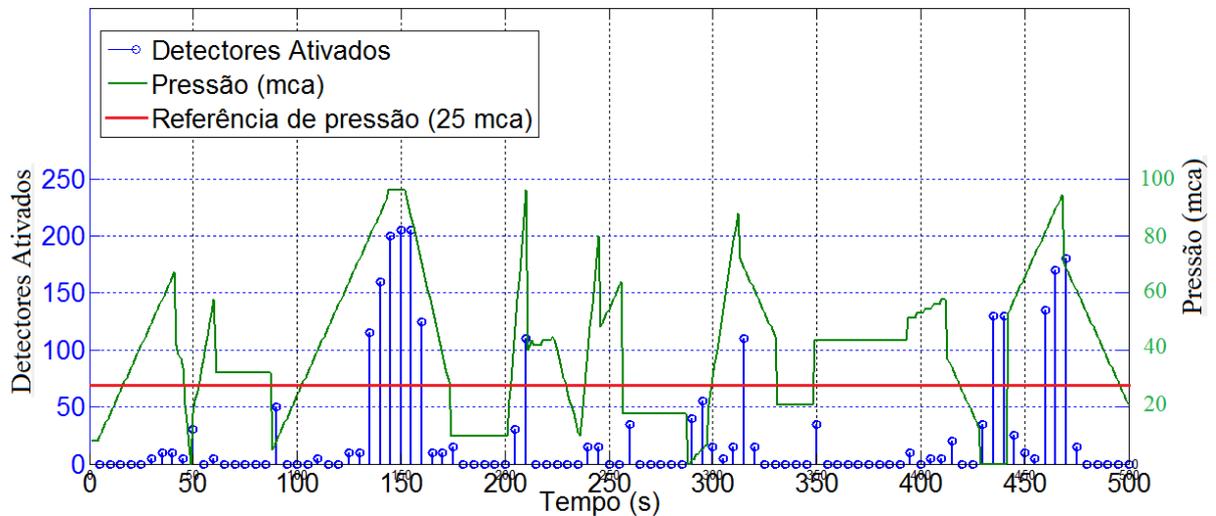
casamento  $r = 4$  e o comprimento de cada vetor  $l = 5$ . O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.7. Observa-se, para as situações cujo intervalo de tempo versam em torno de 180s e em 270s que não houve atuação de nenhum detector ativado. Nestes instantes de tempo, a pressão manteve um valor constante de aproximadamente 13 mca, considerado como situação normal de funcionamento.

FIGURA 5.7 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS COM PONTOS DE ANORMALIDADES (R-HAMMING)



- f) **Detecção com pontos quaisquer (r-contínuos):** foi realizada a simulação para detecção de falhas utilizando-se, também, o critério r-contínuos para pontos quaisquer inseridos. Foram utilizados, nesta simulação, um desvio  $\epsilon = 15$  e um parâmetro de casamento  $r = 4$  e o comprimento de cada vetor  $l = 5$ . A análise, para esta simulação, possui como conclusão o mesmo argumento explicitado na simulação anterior. A quantidade de detectores ativados é inferior ao caso anterior, pois, no critério r-contínuos, a geração destes detectores é mais difícil que na situação utilizada pelo critério r-hamming. O resultado dessa simulação é mostrado na Figura 5.8.

FIGURA 5.8 - DETECÇÃO DE FALHAS APENAS COM PONTOS DE ANORMALIDADES (R-CONTÍNUOS).



## 5.2 COBERTURA DE FALHAS

Foram verificados, mediante análise das simulações anteriores, a porcentagem de **cobertura de falhas** (CF). A porcentagem de cobertura de falhas indica, neste caso, a quantidade de falhas detectadas pelo ASN, correspondentes aos detectores ativados atuantes em respostas as estas falhas. Neste caso, as falhas são comportamentos anormais relacionadas às anormalidades conforme a Figura 4.15, com exceção das falhas inseridas nas simulações correspondentes às letras **e** e **f** (falhas que não estão associadas a nenhum comportamento ou teste de pressão analisado). Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.1.

TABELA 5. 1 - PORCENTAGEM DE COBERTURA DE FALHAS E PROBABILIDADE DE ERRO DE DETECÇÃO NAS SIMULAÇÕES

Simulação	Quantidade de Falhas inseridas	Quantidade de Falhas detectadas pelo ASN	CF (%)
Intervalos de falhas (c) r-hamming	2	2	100
Intervalos de falhas (d) r-contínuos	2	2	100
Pontos quaisquer (e) r-hamming	7	6	85,71
Pontos quaisquer (f) r-contínuos	7	6	85,71

Na Tabela 2 não consta a CF relacionada às duas primeiras simulações (falsos positivos). Não existiu nenhum detector ativado, pois não havia nenhuma falha inserida. De fato, não deveria existir nenhum detector que fosse ativado nessas situações.

### 5.3 TEMPO DE PROCESSAMENTO COMPUTACIONAL

Também foi verificado, mediante algumas simulações realizadas e baseando-se na curva de funcionamento normal (mostrada na Figura 4.14) e na curva com trechos em anormalidades (mostrada na Figura 4.15), o **tempo de processamento computacional** de cada execução do ASN. Esse processo, aqui é definido como o tempo de processamento necessário (considerando a lógica sendo executada no ambiente de programação MATLAB® e utilizando um computador com as características mostradas na seção 4.1.2) para que o ASN defina os dados próprios, gere os detectores aleatórios, promova o casamento desses vetores com os dados próprios, armazene os detectores que não casam em seu conjunto específico e realize a fase de monitoramento dos dados próprios com este conjunto de detectores armazenados com o objetivo de detectar as falhas inseridas. O objetivo dessas simulações é verificar o comportamento (e grau de dependência) do ASN face aos diferentes parâmetros de entrada ( $l, r, \epsilon$ ) utilizados relacionados ao tempo de processamento das informações. Os resultados e análises relativos a cada situação são descritos a seguir:

- a) Variação do parâmetro de casamento  $r$  com valores situados no intervalo  $1 \leq r \leq 5$  (r-hamming).

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  variasse entre 1 (menor valor inteiro possível para este parâmetro) e 5 (mesmo valor correspondente ao comprimento de cada vetor próprio), utilizando o critério de casamento **r-hamming**. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.2. Para o caso em que o parâmetro de casamento  $r$  tender (aproximar) a 1, maior será a área de cobertura de detecção de falhas,

conforme mostrado na Figura 11d, e mais eficientes serão os detectores gerados. Entretanto, a geração dos mesmos será, computacionalmente, mais difícil. De maneira geral, quanto menor for o parâmetro de casamento  $r$ , comparado ao comprimento  $l$ , mais difícil computacionalmente (conforme pode ser observado através da Tabela 5.2 com a CF = 0\*) será a geração dos detectores. No entanto, se for possível obter um conjunto de detectores utilizando valores inversamente proporcionais para  $r$  e  $l$ , a eficiência de cobertura de falhas será maximizada.

TABELA 5. 2 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO  $1 \leq r \leq 5$  (R-HAMMING).

$1 \leq r \leq 5$	desvio $\epsilon$	Nd	$l$	Tempo (s) r-hamming	CF (%)
1	14	100	5	muito alto	0*
2	14	100	5	muito alto	0*
3	14	100	5	muito alto	0*
4	14	100	5	668,69	<b>94,74</b>
5	14	100	5	<b>35,59</b>	88,45

Na situação dos parâmetros  $r = 5$ ,  $\epsilon = 14$  e  $l = 5$ , o tempo de processamento computacional foi de aproximadamente 36 segundos (menor dentre todos observados). Entretanto, a cobertura de falhas foi inferior à situação em que  $r = 4$ . À medida que o parâmetro  $r$  tende ao mesmo valor do comprimento do vetor  $l$ , seu espaço de abrangência de detecção é reduzido. Para que possa ocorrer uma detecção mais eficiente são necessários mais detectores para cobrir o espaço com falhas (não-próprio). Para este caso (os parâmetros  $r$  e  $l$  são iguais), configura-se uma situação de casamento completo (perfeito). Não é observado, neste caso, uma situação interessante, pois isso significa que apenas um único detector é capaz de detectar apenas um vetor não-próprio. Na situação em que  $r = 4$ ,  $\epsilon = 14$  e  $l = 5$ , observa-se, pela Figura 5.5, que embora fossem especificados, inicialmente Nd = 100, isto é, a quantidade de detectores desejados foi igual 100 detectores para a fase de geração e ainda que o tempo de processamento seja maior que a situação de um casamento completo, a quantidade de detectores ativados ultrapassa os 100

detectores especificados inicialmente (observando, em alguns momentos, a terem aproximadamente 500 detectores ativados por falha associada). Todos os dados obtidos nas simulações e que constam nas tabelas dessa seção representam uma média aritmética de alguns testes realizados, cujos resultados individuais versaram sobre valores próximos a essa média.

- b) Variação do parâmetro de casamento  $r$  com valores situados no intervalo  $1 \leq r \leq 5$  com  $N_d = 350$ , (r-hamming).

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  variasse entre 1 (menor valor inteiro possível para este parâmetro) e 5 (mesmo valor correspondente ao comprimento de cada vetor próprio), utilizando o critério de casamento **r-hamming**. Entretanto, para essas simulações, a quantidade de detectores a serem armazenadas no conjunto de detectores (CD) foi alterada de 100 para 350 detectores. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.3. Observa-se que, para valores de  $r$  inferiores a 5, o tempo computacional, na maioria dos casos, foi muito alto, comprometendo a geração dos detectores. A cobertura de falhas (CF) foi igual a zero para a maioria dessas situações, pois nem sequer foi possível a geração de detectores já que o tempo de processamento foi muito alto (CF = 0\*).

TABELA 5. 3 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO  $1 \leq R \leq 5$  COM  $N_D = 350$ , (R-HAMMING).

$1 \leq r \leq 5$	desvio $\epsilon$	$N_d$	$l$	Tempo (s) r-hamming	CF (%)
1	14	350	5	muito alto	0*
2	14	350	5	muito alto	0*
3	14	350	5	muito alto	0*
4	14	350	5	2572,20	<b>98,04</b>
5	14	350	5	<b>72,16</b>	91,89

Na situação em que configura um casamento perfeito ( $r = 5$  e  $\epsilon = 5$ ), o tempo de processamento computacional foi de aproximadamente 72 segundos (maior que o caso simulado no item **a** dessa seção devido, agora, a um aumento na quantidade de detectores desejados). Isto significa que, quanto maior for a quantidade de detectores necessários para promover a detecção de falhas, mais tempo de processamento o algoritmo irá necessitar para realizar o processamento das informações. No entanto, à medida que o parâmetro  $r$  tende ao mesmo valor do comprimento do vetor  $l$ , seu espaço de abrangência de detecção é reduzido. Por isto faz-se necessária uma quantidade maior de detectores para detectar os dados não-próprios. A CF, para esta situação, foi aproximadamente igual a 92%. De maneira semelhante à análise no item **a**, para os parâmetros  $r = 4$ ,  $\epsilon = 14$  e  $l = 5$ , a CF foi maior do que a situação que configura um casamento completo ( $r = L = 5$ ) embora seu tempo de processamento seja, também, maior que aquele caso.

c) Parâmetro de casamento  $r$  tendendo ao comprimento de cada vetor próprio  $l$ . (r-hamming).

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  tendesse (aproximasse) ao comprimento de cada vetor próprio  $l$  utilizando o critério de casamento **r-hamming**. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.4.

TABELA 5. 4 - PARÂMETRO DE CASAMENTO R TENDENDO AO COMPRIMENTO DE CADA VETOR PRÓPRIO L (R-HAMMING) COM ND = 100 DETECTORES.

$r \rightarrow l$	desvio $\epsilon$	Nd	$l$	Tempo (s) r-hamming	CF (%)
4,5	14	100	5	36,49	<b>96,76</b>
4,6	14	100	5	29,97	95,98
4,7	14	100	5	30,71	95,01
4,8	14	100	5	39,16	93,99
4,9	14	100	5	<b>28,84</b>	92,87

Observa-se que, para o caso do parâmetro utilizado  $r = 4,9$  (valor mais próximo do casamento completo,  $r = 5$ ), o tempo de processamento é o menor dentre os observados. Entretanto, a CF maior corresponde ao parâmetro  $r = 4,5$  (menor dos parâmetros analisados nesta situação). A análise aqui realizada segue a mesma diretiva da análise realizada no item **a** dessa seção para o caso do valor de  $r$  tende a ter o valor de  $l$  (igual a 5) e  $r$  ser o menor dentre os mais próximos a este valor de  $l = 5$ .

d) Variação do parâmetro de casamento  $r$  com valores situados no intervalo  $1 \leq r \leq 5$ . (r-contínuos).

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  variasse entre 1 (menor valor inteiro possível para este parâmetro) e 5 (mesmo valor correspondente ao comprimento de cada vetor próprio), utilizando o critério de casamento **r-contínuos**. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.5. Observa-se que, para a maioria dos valores de  $r$  inferiores a 5, semelhantemente as situações simuladas no item **a**, o tempo computacional foi muito alto (às vezes executando indefinidamente o programa), comprometendo a geração dos detectores. A cobertura de falhas (CF) foi igual a zero para a maioria desses casos, pois nem sequer foi possível a geração de detectores com estes parâmetros, CF = 0\*).

TABELA 5. 5 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO  $1 \leq R \leq 5$ . (R-CONTÍNUOS) COM ND = 100 DETECTORES.

$1 \leq r \leq 5$	desvio $\epsilon$	Nd	$l$	Tempo (s) r-contínuos	CF (%)
1	15	100	5	muito alto	0*
2	15	100	5	muito alto	0*
3	15	100	5	145,90	84,98
4	15	100	5	49,79	<b>95,03</b>
5	15	100	5	<b>12,97</b>	0

Na situação dos parâmetros  $r = 5$  e  $l = 5$  o tempo de processamento computacional foi de aproximadamente 13 segundos. Entretanto, a cobertura de falhas foi igual a zero. Isto ocorreu porque, como o comprimento de cada vetor próprio é igual a parâmetro de casamento  $r$ , não existiu nenhum vetor que fosse formado, após o processo da fase 1 do ASN, que contivesse todos os seus elementos iguais ao valor “1” (única condição para que houvessem detectores compatíveis com esses parâmetros de entrada). Para o caso em que  $r = 4$ ,  $\epsilon = 15$  e  $l = 5$ , observa-se, pela Figura 5.6, que embora fossem especificados, inicialmente  $N_d = 100$  detectores, a quantidade de detectores ativados ultrapassa esse valor (observando, em alguns momentos, a terem aproximadamente 180 detectores ativados por falha associada). Isto significa dizer que existem mais detectores cobrindo uma determinada área não-própria implicando em uma CF maior.

- e) Variação do parâmetro de casamento  $r$  com valores situados no intervalo  $1 \leq r \leq 5$  com  $N_d = 350$  (r-contínuos)

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  variasse entre 1 (menor valor inteiro possível para este parâmetro) e 5 (mesmo valor correspondente ao comprimento de cada vetor próprio), utilizando o critério de casamento **r-contínuos**. Entretanto, para estas simulações, a quantidade de detectores a serem armazenadas no conjunto de detectores (CD) foi alterada de 100 para 350 elementos. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.6. Observa-se que, para valores de  $r$  inferiores a 5, o tempo computacional, na maioria das vezes, foi muito alto, comprometendo a geração dos detectores (CF = 0\*).

Na situação em que configura um casamento perfeito ( $r = 5$  e  $\epsilon = 5$ ), o tempo de processamento computacional foi de aproximadamente 25 segundos (maior que o caso simulado no item **d** dessa seção para este parâmetro de casamento e o menor dentre todos os tempos observados nesta etapa das simulações) devido, agora, a um aumento na quantidade de detectores desejados. Entretanto, a CF

correspondente foi igual a zero, tendo como justificativa a mesma análise do item **d** dessa seção para este valor de  $r$ . A CF associada aos parâmetros  $r = 4$  e  $l = 5$  foi a maior dentre todas obtidas nesta simulação.

TABELA 5. 6 - VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DE CASAMENTO COM VALORES SITUADOS NO INTERVALO  $1 \leq r \leq 5$  COM  $Nd = 350$  (R-CONTÍNUOS)

$1 \leq r \leq 5$	desvio $\epsilon$	Nd	$l$	Tempo (s) r-contínuos	CF (%)
1	15	350	5	muito alto	0*
2	15	350	5	muito alto	0*
3	15	350	5	300,57	89,98
4	15	350	5	91,45	<b>95,13</b>
5	15	350	5	25,37	0

f) Parâmetro de casamento  $r$  tendendo ao comprimento de cada vetor próprio  $l$ . (r-contínuos).

Foi verificado o tempo de processamento para situações em que o parâmetro de casamento  $r$  tendesse (aproximasse) ao comprimento de cada vetor próprio  $l$  utilizando o critério de casamento **r-contínuos**. Os resultados médios obtidos encontram-se na Tabela 5.7. Para todas as situações a CF associadas a cada uma delas foi igual a zero, reportando-se, novamente, ao argumento explicitado no item **d** dessa seção de simulações.

TABELA 5. 7 - PARÂMETRO DE CASAMENTO R TENDENDO AO COMPRIMENTO DE CADA VETOR PRÓPRIO L. (R-CONTÍNUOS) E COM  $Nd = 100$  DETECTORES.

$r \rightarrow l$	desvio $\epsilon$	Nd	$l$	Tempo (s) r-contínuos	CF (%)
4,5	15	100	5	16,45	0
4,6	15	100	5	12,22	0
4,7	15	100	5	14,14	0
4,8	15	100	5	14,18	0
4,9	15	100	5	12,62	0

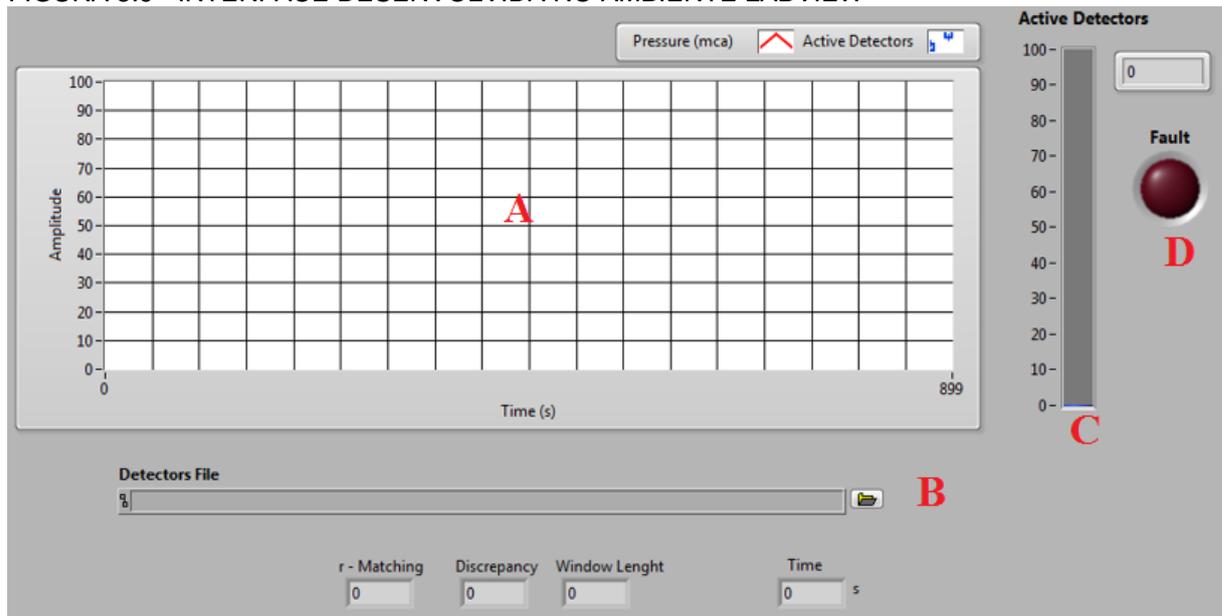
#### 5.4 MONITORAMENTO DE FALHAS EM UMA PLATAFORMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Com o objetivo de verificar a atuação do ASN (atendendo a restrições temporais como tempo de processamento de dados de entrada e tempo de resposta do sistema), foi utilizada uma planta física que simula um abastecimento de água e inserida algumas falhas neste sistema e uma interface que foi utilizada para verificação da atuação do ASN. A interface (e lógica de implementação do algoritmo na fase de monitoramento para essa finalidade) de programação utilizada para a verificação do ASN foi implementada no LabVIEW™ 2012.

O LabVIEW™ (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica, desenvolvida pela *National Instruments*, que utiliza blocos, em vez de linhas de texto, para criar aplicações. Diferente das demais linguagens de programação, que utilizam linhas de código, o programa computacional LabVIEW™ faz uso de uma linguagem conhecida como **linguagem G**, que é composta de muitos nós conectados, ou seja, é uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones em vez de linhas de texto para criar aplicações (CAMBOIM, 2012). Em contraste às linguagens de programação baseadas em texto, em que instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW™ utiliza programação baseada em fluxo de dados em que o fluxo dos dados determina a execução. No LabVIEW™, o programador constrói uma interface (humano-máquina) denominada interface de usuário utilizando um conjunto de ferramentas e objetos específicos do programa. Esta interface é conhecida como **Painel Frontal**. Dessa forma, o programador adiciona o código utilizando representações gráficas específicas de funções para controlar os objetos do painel frontal. O **diagrama de bloco** é o local específico do LabVIEW™ que contém esse código. Sob certos aspectos, o diagrama de bloco do LabVIEW™ assemelha-se a um fluxograma.

A interface (a partir da lógica de programação desenvolvida para a segunda fase do ASN) para monitoramento de falhas é mostrada na Figura 5.9.

FIGURA 5.9 - INTERFACE DESENVOLVIDA NO AMBIENTE LABVIEW



A seguir é mostrada uma descrição geral da estrutura que constitui a interface implementada no LABVIEW™. Seus componentes principais são:

**Janela de visualização dos gráficos (A):** consiste na janela que irá mostrar a evolução da curva de pressão bem como os detectores ativados, toda vez que ocorrer uma falha no sistema;

**Botão carregamento de parâmetros (B):** um botão em que são carregados os parâmetros de entrada do ANS:  $r$ , desvio e  $L$  (neste caso para realizar a função de monitoramento dos dados). Os detectores são gerados (mediante a Fase 1 do ASN) pelo programa computacional desenvolvido no MATLAB®, salvos em formato .txt e carregados para o programa desenvolvido na interface de programação LABVIEW™. Estes detectores serão responsáveis por detectar quaisquer anomalias que ocorram no sistema (*online*) na Fase 2 (monitoramento) do ASN;

**Barra gráfica (C):** está relacionada a quantidade de detectores atuantes na falha. Representa a detecção percentual relativa a detectores ativados (variando na forma de preenchimento na cor azul toda vez que os detectores estiverem atuando na curva). Esta detecção percentual varia entre 0% (não há atuação de nenhum detector) até 100% (há atuação de todos os detectores);

**LED indicador de falhas (D):** toda vez que qualquer falha for detectada pelo ASN, um LED emitirá um sinal luminoso para indicar esta perturbação. Paralelo ao sinal indicativo do LED haverá um sinal sonoro indicando ao operador o momento de ocorrência da falha.

#### 5.4.1 TESTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS

Para a verificação da atuação do ASN na planta buscando sempre otimização de seus resultados, foram realizados testes e simulações, variando os parâmetros de entrada do ASN ( $r$ , **desvio  $\epsilon$**  e  $L$ ) em cada um deles e modificando a maneira de como as variáveis de entrada (pressões e suas respectivas derivadas) são utilizadas. Dessa forma os testes visam identificar qual(is) seria(m) a(s) variável(eis) mais viável (eis) para obter uma maior eficiência de geração de detectores e detecção de anomalias por parte do ASN no caso de aplicabilidade deste algoritmo em uma planta física.

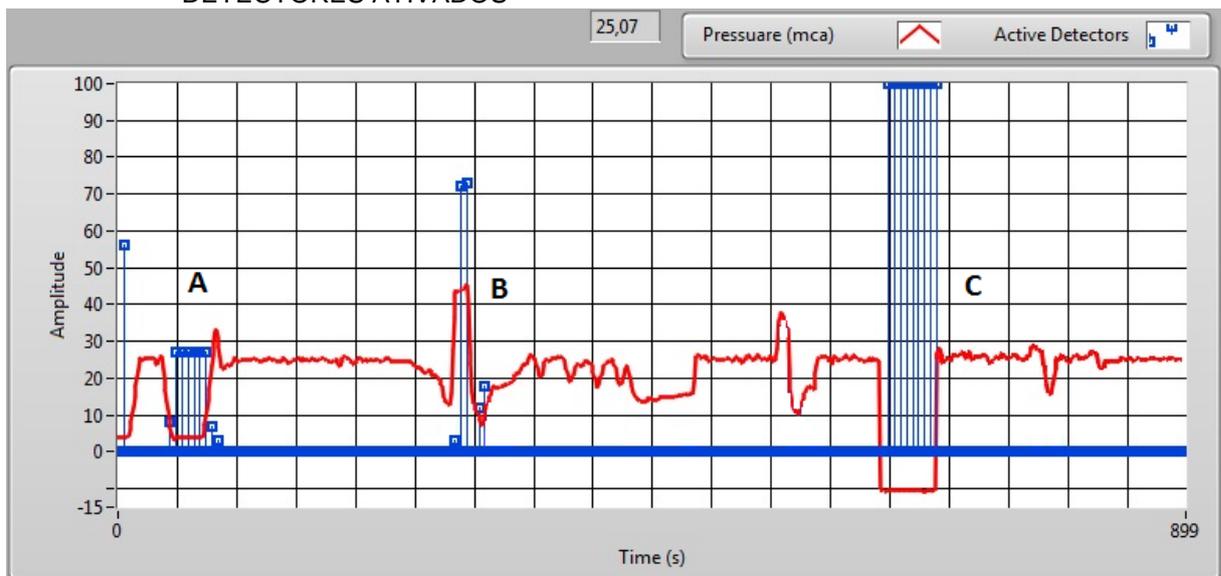
##### a) Teste 1: utilizando a referência (25 mca) e variações normais de pressão

O primeiro experimento realizado foi utilizando os dados obtidos a partir da medição do PT3 em condições normais/aceitáveis de operação (conforme mostrado na Figura 4.14) utilizando a técnica de **janelamento** dos dados para obtenção dos vetores próprios. O PT3 é um sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação (conforme indicado pelo índice 05 da Figura 4.3). Dessa forma, foram utilizados os detectores gerados, de maneira *offline* (fase 1) pelo software MATLAB® e inseridos no ambiente LABVIEW™ (para promover a fase 2, monitoramento, do algoritmo). Em seguida foram inseridas falhas reais no sistema para verificar a atuação do ASN mediante estas falhas. Os parâmetros de entrada foram determinados após testes para obtenção dos parâmetros ótimos tomando como referencial a maior porcentagem de cobertura de falhas (CF) obtida. As falhas inseridas foram baseadas no desligamento da energização de alguns elementos da planta (no caso dos conjuntos motores-bombas e do sensor de pressão) e do fechamento e aberturas totais das válvulas envolvidas. Como respostas, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.8.

TABELA 5. 8 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DA VARIÁVEL PRESSÃO COMO ENTRADA DO ASN.

r	Desvio $\epsilon$	L	Falha no gráfico	Falha inserida	Falha detectada pelo ASN ?	Correção da falha (manual) (*)	Atuação do Controle Fuzzy pós (*)?
2	40	10	A	Desligamento da bomba principal	Sim	Restabelecimento da alimentação da bomba principal	Sim
			B	VCP e válvula manual totalmente fechadas (concomitantemente)	Sim	VCP e válvula manual aberta	Sim
			C	PT3 (sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação) sem comunicação (falha na alimentação do sensor)	Sim	Restabelecimento da alimentação do PT3	Sim
					<b>CF = 100%</b>		

FIGURA 5.10 - CURVA DE PRESSÃO NORMAL ACRESCIDA DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS



Observa-se pelos dados da Tabela 5.8 que a cobertura de falhas (CF) que, neste caso, representa a atuação do ASN a qualquer anormalidade inserida em qualquer elemento da planta, foi de 100%, isto é, o ASN foi capaz de detectar todas as falhas inseridas e o controle Fuzzy atuou na planta quando as anormalidades foram eliminadas (de maneira manual, por exemplo, energizando novamente o sensor PT3).

Pode ser conferida a associação entre cada falha inserida e a resposta do ASN a cada uma dessas falhas (indicada pelas letras maiúsculas A, B e C) a partir da Figura 5.10. Observa-se, particularmente na falha C, que ocorreu uma pressão “negativa”, detectada pelo ASN. Na realidade, essa pressão é um valor referencial, denominado de **pressão manométrica** que corresponde à diferença de pressão entre o sistema a ser medido (nesse caso o sensor PT3) e o sistema de referência (nesse caso 25 mca e variações aceitáveis). Como a pressão, manométrica, foi negativa significa que o sistema medido está a uma pressão inferior à pressão de referência.

Dessa forma, pode-se concluir que, nesta etapa, a pressão foi uma variável satisfatória para servir de variável de entrada para atuação do ASN.

Os próximos experimentos objetivaram verificar a possibilidade de atuação e resposta do ASN utilizando outra(s) referência(s) de variáveis (não apenas a pressão do sensor PT3) de entrada para validação da técnica de detecção verificando, a eficiência de cada uma dessas variáveis.

#### b) Teste 2: utilização da derivada de pressão do PT3

Foi utilizada, como referencial para a geração de detectores e posterior atuação do ASN na planta, a derivada de pressão referente ao PT3 (sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação). Esta variável corresponde à tendência em antecipar o comportamento futuro da pressão auxiliando na retroalimentação para se antecipar as ações de controle do sistema. Seu cálculo é realizado promovendo a diferença entre um valor de pressão atual e um valor de pressão imediatamente anterior, dividida pelo intervalo de tempo ocorrido entre essas duas pressões. A curva relativa à pressão (com trechos de falhas inseridas) e sua curva de derivada de pressão associada, correspondentes ao sensor PT3, são

mostradas na Figura 5.11 e a resposta dos detectores ativados em relação às falhas inseridas são mostradas na Figura 5.12 e na Tabela 5.9.

FIGURA 5.11 - CURVAS DE PRESSÃO ACRESCIDA DE FALHAS E DERIVADA DE PRESSÃO.

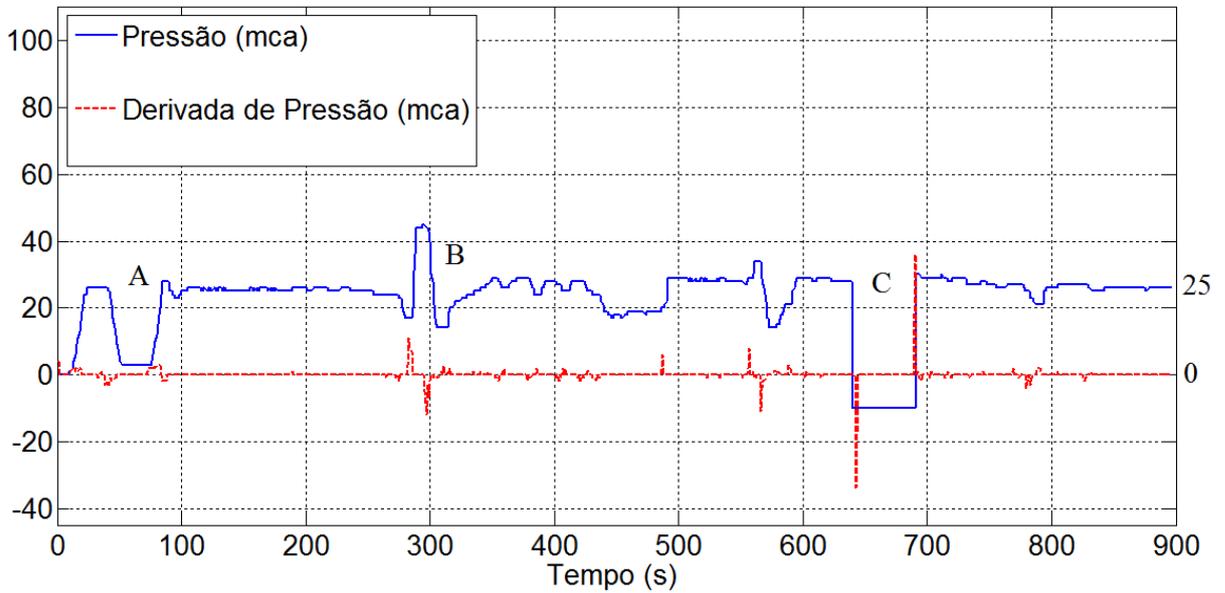


FIGURA 5.12 - CURVA DE DERIVADA DE PRESSÃO ACRESCIDA DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS.

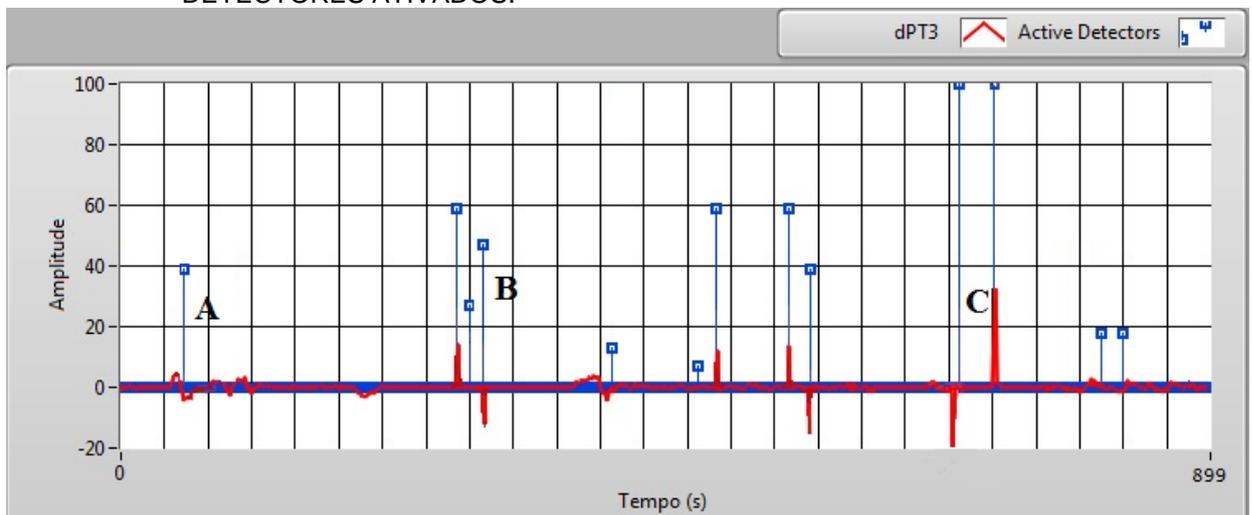


TABELA 5. 9 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DA VARIÁVEL DERIVADA DE PRESSÃO COMO ENTRADA DO ASN.

r	Desvio ε	L	Falha no gráfico	Falha inserida	Falha detectada pelo ASN ?	Correção da falha (manual) (*)	Atuação do Controle Fuzzy pós (*)?
2	1,75	5	A	Desligamento da bomba principal	Parcialmente/Não	Restabelecimento da alimentação da bomba principal	Sim
			B	VCP e válvula manual totalmente fechadas (concomitantemente)	Parcialmente/Sim	VCP e válvula manual aberta	Sim
			C	PT3 (sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação) sem comunicação (falha na alimentação do sensor)	Parcialmente/Não	Restabelecimento da alimentação do PT3	Sim
					<b>CF = 33,33%</b>		

Na Figura 5.12, a característica representada pela cor vermelha corresponde à derivada da curva de pressão associada ao sensor PT3 e o sinal representado pela cor azul corresponde aos detectores ativados.

Observa-se, para este experimento, que a cobertura de falhas (CF) que, neste caso, também representa a atuação do ASN a qualquer anormalidade inserida em qualquer elemento da planta, foi de aproximadamente 33%, isto é, o ASN não foi capaz de detectar as falhas relacionadas às letras A e C. O diagnóstico dessas falhas foram descritos como parcialmente pois o ASN apenas foi capaz de detectar, apenas, os instantes de início e fim das falhas A e C. Isto é verificado devido a variável “derivada”, como um todo, está relacionada à inclinação da curva (nesse caso de pressão). Quando a bomba (falha A) e o sensor de pressão PT3 (falha C) deixaram de atuar no sistema, os valores respectivos de pressão medidos foram constantes. Esses valores permaneceram invariáveis por um determinado instante de tempo até que as falhas associadas aos dispositivos em questão fossem eliminadas. Dessa forma, como não houve variação da curva de pressão (a derivada

de qualquer valor constante possui resultado igual a zero) as falhas não foram detectadas embora elas estivessem presentes.

De maneira geral, nos momentos em que não há oscilações no comportamento da curva de derivada (momentos em que a pressão encontra-se estabilizada por diversos motivos) não há atuação dos detectores ativados. Assim, conclui-se que apenas a variável derivada de pressão não é uma candidata eficiente para ser utilizada como variável de referência para atuação do ASN.

c) Teste 3: utilização do método de agrupamento (codificação) com concatenamento das variáveis pressão e derivadas de pressão

Foram utilizadas, a fim de verificação da eficiência do ASN, valores de pressão e suas respectivas derivadas provenientes dos sensores instalados na planta: um localizado a montante e outro localizado a jusante de cada motor-bomba (totalizando quatro elementos sensores) juntamente com o sensor PT3 (já descrito em situações anteriores). Teoricamente, cada derivada de pressão corresponde à inclinação da reta daquela função (pressão) em um determinado instante de tempo. Na prática, a utilização das derivadas de pressão no sistema implica em descrever a tendência ao qual deve seguir sua variável e é obtida pela diferença registrada entre a pressão atual e a pressão anterior, dividida pelo intervalo de tempo ocorrido entre essas duas pressões. Essa variável facilita as ações do controlador em se antecipar às perturbações do sistema tornando-o mais eficaz. Existiram 03 (três) situações para as derivadas de pressão: derivada negativa (redução de pressão em um determinado instante), positiva (aumento de pressão em um determinado instante) e nula (valor ideal zero indicando que a variável “pressão” não sofreu variação).

Para a formação de um vetor próprio que contém os valores de pressão e derivadas dos cinco sensores, foram adotadas as seguintes nomenclaturas de dados: os índices 11 e 12 indicam que a leitura de cada pressão (ou derivada) foi obtida mediante a localização de um sensor instalado antes e outro localizado após o conjunto CMB-01 (principal). Os índices 21 e 22 indicam que a leitura de cada pressão (ou derivada) foi obtida mediante a localização de um sensor de pressão instalado antes e outro localizado após o conjunto CMB-02 (auxiliar). O índice 3

corresponde às leituras obtidas associadas ao sensor localizado no ponto de consumo da instalação (PT3).

Dessa forma, foram obtidos 05 (cinco) valores de pressão e 05 (cinco) valores de derivadas de pressão obtidos a partir dos cinco sensores de pressão existentes na planta. Cada vetor é formado por 10 (dez) elementos em um determinado instante de tempo. Os elementos de cada vetor foram agrupados de maneira que os valores correspondentes à pressão ficassem alocados no início do vetor e os valores correspondentes à derivada ficaram alocados ao final do vetor, conforme disposição a seguir:

$$V_n = [P_{11} P_{12} P_{21} P_{22} P_3 d_{11} d_{12} d_{21} d_{22} d_3]$$

Em que  $V_n$  corresponde ao n-ésimo vetor pertencente ao conjunto de vetores próprios,  $P_{ij}$  corresponde ao valor de pressão obtido, em um determinado instante de tempo, a partir de cada sensor de pressão e  $d_{ij}$  corresponde a cada valor de derivada de pressão, obtido no mesmo instante de tempo das leituras de pressão, associada a cada valor de pressão  $P_{ij}$ . Essa disposição dos dados foi denominada **concatenamento** de dados.

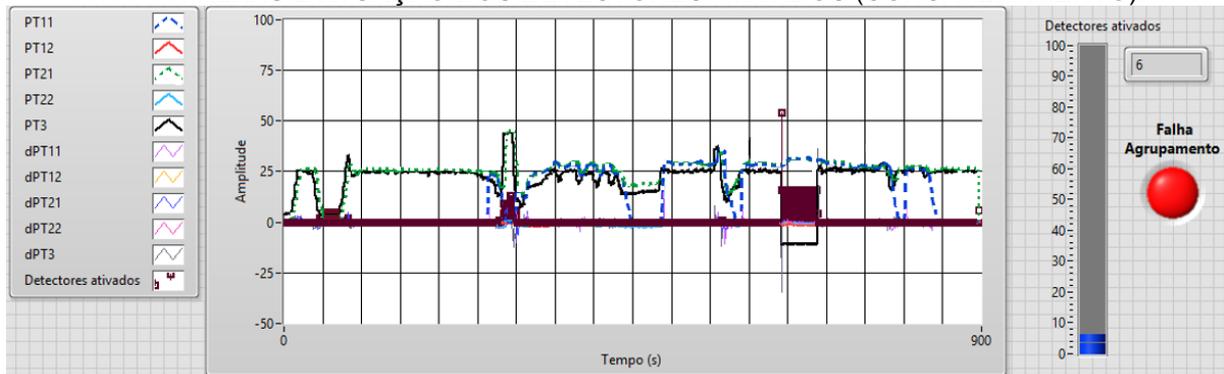
Foram inseridas falha em determinados instantes de tempo para verificação da atuação do ASN. Os parâmetros utilizados foram:  $r = 3$ ,  $\epsilon = 30$  e  $L = 10$  (correspondendo a parâmetros ótimos para esse teste). Os dados obtidos são mostrados na Tabela 11 e as curvas correspondentes são mostradas na Figura 5.13.

Na Figura 5.13, a cor marrom refere-se aos detectores ativados. Observa-se que, quando as falhas (A, B e C) são inseridas no sistema, os detectores atuam, detectando as anormalidades. No teste verificado no item **b** (apenas com a derivada de pressão de PT3) as falhas não eram detectadas quando uma determinada anomalia permanecia (de maneira constante) atuando no sistema (como é o caso da falha C que permaneceu sem a leitura do sensor PT3 por um instante de tempo). Neste experimento, utilizando o combinado de variáveis de entrada esta falha foi detectada. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.10.

TABELA 5. 10 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PRESSÃO E DERIVADAS DE PRESSÃO (CONCATENAMENTO).

r	Desvio $\epsilon$	L	Falha no gráfico	Falha inserida	Falha detectada pelo ASN ?	Correção da falha (manual) (*)	Atuação do Controle Fuzzy pós (*)?
3	30	10	A	Desligamento da bomba principal	Sim	Restabelecimento da alimentação da bomba principal	Sim
			B	VCP e válvula manual totalmente fechadas (concomitantemente)	Sim	VCP e válvula manual aberta	Sim
			C	PT3 (sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação) sem comunicação (falha na alimentação do sensor)	Sim	Restabelecimento da alimentação do PT3	Sim
					<b>CF = 100%</b>		

FIGURA 5.13 - CURVA DE PRESSÕES E DERIVADAS DE PRESSÃO NORMAIS ACRESCIDAS DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS (CONCATENAMENTO).



A cobertura de falhas (CF) para esse teste foi 100% significando que todas as falhas inseridas foram detectadas pelo ASN. Dessa forma, a técnica de agrupamento de dados baseado no concatenamento das variáveis de entrada (pressões e respectivas derivadas) pode ser utilizado como dados de entrada para verificação da eficiência do algoritmo.

d) Teste 4: utilização do método de agrupamento (codificação) com intervalamento das variáveis pressão e derivadas de pressão

Foram utilizadas, a fim de verificação da eficiência do ASN, valores de pressão e suas respectivas derivadas provenientes dos sensores instalados na planta. No entanto, para esse teste, foram utilizadas uma disposição de dados diferente daquela utilizada no teste anterior. Cada vetor, nesta disposição, formado por valores de pressão e de derivadas de pressão, possuíam seus elementos agrupados de maneira que cada valor de pressão fosse intercalado (alternado) com cada valor de derivada de pressão associada àquela variável, conforme disposição a seguir:

$$V_n = [P_{11} d_{11} P_{12} d_{12} P_{21} d_{21} P_{22} d_{22} P_3 d_3]$$

Em que  $V_n$  corresponde ao n-ésimo vetor pertencente ao conjunto de vetores próprios,  $P_{ij}$  corresponde ao valor de pressão obtido, em um determinado instante de tempo, a partir de cada sensor de pressão e  $d_{ij}$  corresponde a cada valor de derivada de pressão, obtido no mesmo instante de tempo das leituras de pressão, associada a cada valor de pressão  $P_{ij}$ . Esta disposição dos dados foi denominada **intervalamento** de dados.

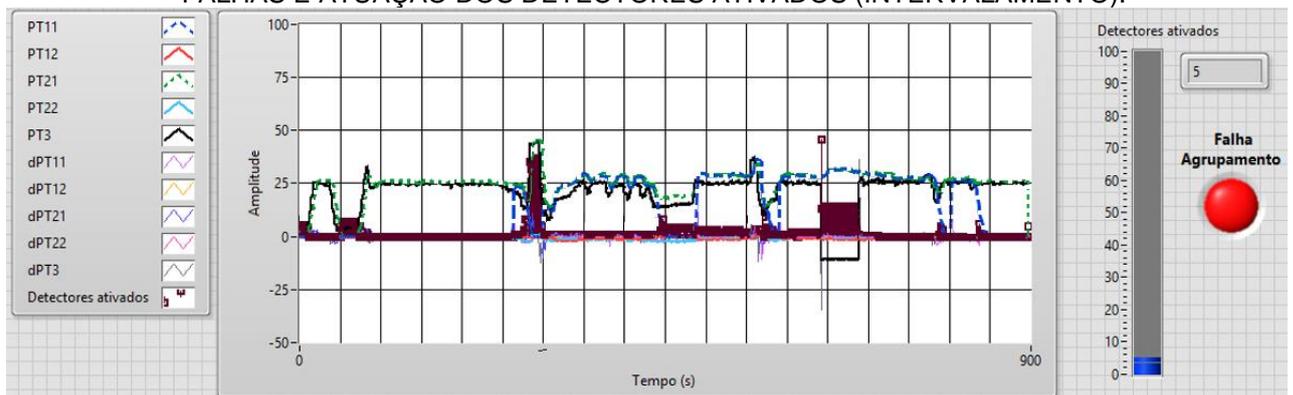
Foram inseridas falha em determinados instantes de tempo para verificação da atuação do ASN. Os parâmetros utilizados foram:  $r = 3$ ,  $\epsilon = 30$  e  $L = 10$ . Os dados obtidos são mostrados na Tabela 12 e as curvas correspondentes são mostradas na Figura 5.14.

Na Figura 5.14, a cor marrom refere-se aos detectores ativados. Observa-se que, de maneira semelhante ao teste anterior, quando as falhas (A, B e C) são inseridas no sistema, os detectores atuam, detectando as anormalidades. No teste verificado no item **b** (apenas com a derivada de pressão de PT3) as falhas não eram detectadas quando uma determinada anomalia permanecia (de maneira constante) atuando no sistema (como é o caso da falha C que permaneceu sem a leitura do sensor PT3 por um instante de tempo). Nesse teste, semelhante ao anterior, utilizando o combinado de variáveis de entrada esta falha foi detectada. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.11.

TABELA 5. 11 - PARÂMETROS, TESTES E RESULTADOS PARA UTILIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PRESSÃO E DERIVADAS DE PRESSÃO (INTERVALAMENTO).

r	Desvio $\epsilon$	L	Falha no gráfico	Falha inserida	Falha detectada pelo ASN ?	Correção da falha (manual) (*)	Atuação do Controle Fuzzy pós (*)?
3	30	10	A	Desligamento da bomba principal	Sim	Restabelecimento da alimentação da bomba principal	Sim
			B	VCP e válvula manual totalmente fechadas (concomitantemente)	Sim	VCP e válvula manual aberta	Sim
			C	PT3 (sensor de pressão localizado no ponto de consumo da instalação) sem comunicação (falha na alimentação do sensor)	Sim	Restabelecimento da alimentação do PT3	Sim
					<b>CF = 100%</b>		

FIGURA 5.14 - CURVA DE PRESSÕES E DERIVADAS DE PRESSÃO NORMAIS ACRESCIDAS DE FALHAS E ATUAÇÃO DOS DETECTORES ATIVADOS (INTERVALAMENTO).



A cobertura de falhas (CF), também para esse teste, foi 100%. Isto significa que todas as falhas inseridas foram detectadas pelo ASN. Dessa forma, a técnica de agrupamento de dados baseado no intervalamento das variáveis de entrada (pressões e respectivas derivadas) pode ser utilizada como dados de entrada para verificação da eficiência do algoritmo.

## **6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS**

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O Algoritmo de Seleção Negativa é uma abordagem recente aplicada à detecção de anomalias e, neste trabalho, foram apresentados estudos teóricos, simulações e experimentos práticos acerca da utilização deste algoritmo. O objetivo foi a detecção de falhas em um sistema que emula um abastecimento de água utilizando, neste caso, a lógica fuzzy para o controle. Também foram descritos alguns tipos de falhas que ocorrem em sistemas de controle e que podem comprometer o funcionamento destes sistemas. A técnica de detecção de falhas analisada permite a detecção e uma ação futura de correção das anormalidades por parte de um operador que esteja supervisionando o sistema. As ações de detecção de anormalidades e do controle (no caso deste trabalho da pressão no sistema) podem trazer benefícios para o sistema como redução do desgaste das peças (falhas sendo detectadas precocemente podem ser corrigidas antecipadamente) evitando a fadiga dos elementos, implicando consequentemente na redução de custos financeiros, redução do volume de vazamentos, otimização do consumo e do custo com energia elétrica, dentre outras benesses.

Foi comprovado, através da utilização de recursos computacionais, que o ASN requer um esforço considerável durante a fase de geração de detectores, pois cada vez que esta fase é executada um novo conjunto de detectores é selecionado devido à natureza aleatória da geração dos detectores candidatos. No entanto, esta fase é realizada de maneira *offline*. Já a fase de monitoramento requer um baixo esforço computacional e a mesma pode ser realizada de maneira *online* (conforme comprovada com a utilização da ferramenta computacional LABVIEW™). Dessa forma, a técnica descrita permite a sua aplicação, após adequação à realidade do sistema físico, em sistemas de controle em contextos industriais quando for realizar a função de monitoramento de falhas em uma determinada planta.

Foi observado, durante os testes de verificação da eficiência do ASN que as técnicas relacionadas ao agrupamento (codificação) de variáveis apresentaram maiores sensibilidade em detectar falhas que os testes que envolveram a técnica de janelamento de dados. A técnica de janelamento depende do tamanho da janela de tempo para iniciar a detecção de uma falha. A técnica de agrupamento (codificação) de variáveis inicia a detecção assim que a anormalidade é inserida no sistema, não

necessitando de um instante de tempo para início de detecção da falha. Dessa forma, essas disposições de dados poderão ser utilizadas em testes mais aprofundados quanto a análise do algoritmo em outras aplicações. Nesse sentido, os resultados experimentais mostraram que a capacidade de detecção de falhas é efetiva utilizando o Algoritmo de Seleção Negativa.

Como sugestão de trabalho futuro, poderia ser implementado um mapeamento de todos os elementos da planta, verificando as possibilidades de ocorrência de falhas em cada um deles. Isso poderia ser implementado através do armazenamento de informações técnicas de operação de cada elemento (bomba, válvula, etc.), em um banco de dados e comparando essas especificações com parâmetros extraídos durante o funcionamento da planta. Uma vez que uma falha é detectada, através de operações anormais de funcionamento, um algoritmo (a ser implementado) compararia os parâmetros anormais com aqueles extraídos das especificações normais. Dessa forma, o ASN atuando, conjuntamente com o algoritmo, não apenas detectaria a(s) falha(s), mas também indicaria em qual(is) elemento(s) específico(s) (ou local da planta) essa(s) falha(s) está(ão) ocorrendo. Isto promoveria uma ação do operador (ou equipe de manutenção) em corrigir a anormalidade antes que a mesma ocasione danos consideráveis ao sistema.

Outra sugestão de trabalho seria a atuação do ASN em detecção de falhas específicas do controlador utilizado (que também poderia ser utilizada outra forma de controle tal como PID, microcontroladores, etc.). Por exemplo, um sinal de controle enviado por parte do operador ao controlador não ser processado ou ser processado não plenamente, implicando em uma ação de controle não eficiente em um determinado elemento da planta que necessite dessa ação (por exemplo, efeito *stiction* em uma válvula). Isso seria detectado como falha específica da ação de controle e não falha do elemento atuador (válvula) da planta.

## **7. TRABALHOS PUBLICADOS**

## 7 TRABALHOS PUBLICADOS

LIMA, R. P. G.; SOUZA, C. P.; ARRUDA, B. W. S.; *Experimental Platform for Faults Detection in Fuzzy Controllers Based On Artificial Immune Systems*. In: International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2013, Minneapolis. Proceedings of 2013 International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC 2013;

LIMA, R. P. G.; ARRUDA, B. W. S.; SOUZA, C. P.; *Fault Detection Based On Artificial Immune Systems For A Temperature Control System Using PID Controller*. In: 12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics, 2013, Florence. Conference Proceedings of 12th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics, 2013;

ARRUDA, B. W. S.; LIMA, R. P. G.; SOUZA, C. P.; *An Artificial Immune System based Anomaly Detection Method applied on a Temperature Control System*. In: 12th IMEKO TC10, Int. J. Industrial Electronics and Drives, 2013.

## **8. REFERÊNCIAS**

## 8 REFERÊNCIAS

ABDELHADI, A. **The Use of Artificial Immune System Algorithms in Monitoring Industrial, Sciences of Electronics**, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT), 2012 6th International Conference on. P. 50 55, Mar 2012.

AMARAL, Jorge Luis Machado **Sistemas Imunológicos Artificiais Aplicados à Detecção de Falhas**. Rio de Janeiro: PUC 2006. 121 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BERENJI, H. R. e KHEDAR, P., **Learning and Tuning Fuzzy Logic Controllers Through Reinforcements**, *IEEE Trans. Neural Network*, vol. 3, 724 – 740, Jan 1992.

BEZERRA, S. T. M., **Sistema Fuzzy para o Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando a Economia de Água e Energia**. João Pessoa: UFPB, 2009. 129 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

CAMBOIM, Wil Lavor Lucena, **Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy em Sistemas de Bombeamento de Água Visando Melhoria no Rendimento Energético e Hidráulico**. João Pessoa: UFPB, 2012. 123 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

CASTRO, D., NUNES, L., REGATTIERI, M.; **FaiNet: An Immune Algorithm For Fuzzy Clustering**. *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2012 *IEEE International Conference on*, v.1, p. 1 9, Jun 2012.

CHANG, Y. F. Li, G. H., ZHANG, C. J., LIANG, S. H; **Modified Real-value Negative Selection Algorithm and its Application on Fault Diagnosis**. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v.1, p. 216 219, Jul 2011.

- CHEN, Y., FENG, C., C. ZHANG, Q., TANG, C., **Negative Selection Algorithm with Variable-Sized r- Contiguous Matching Rule.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v.1, p.150 154, Dec. 2010.
- DASGUPTA, D., **Artificial Neural Networks and Artificial Immune Systems: Similarities and Differences.** *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Orlando, p. 12 15, Oct. 1997.
- FORREST, S., PERELSON, A. S., ALLEN, L e CHERUKURI R. **Self-Nonself Discrimination in a Computer.** *Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy*, Oakland, CA, p. 202 212, May 1994.
- GONZALES, F., DASGUPTA, D., NIÑO, L. F., **A Randomized Real-Value Negative Selection Algorithm.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, May. 2003.
- GUO, J. H; **A Negative Selection Algorithm Integrated with Immune Network Theory.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v.1, p.859 863, May. 2012.
- HARRIS, C. J., MOORE, C. G. e BROWN, M., **Intelligent Control – Aspects of Fuzzy Logic end Neural Nets**, World Scientific Publishing, 1993.
- IDRIS, I., Selamat, A., **Negative Selection Algorithm In Artificial Immune System For Span Detection.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v.1, p.379 382, Dec. 2011.
- JANTZEN, J., **Foundations of Fuzzy Control.** ed.1. Chichester, West Sussex, 2007.
- JIN, Q., **A Method to Construct Self Set for IDS Based on Negative Selection Algorithm.** *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v.1, p.1051 1053, Aug. 2011.
- KOHAGURA, T., **Lógica fuzzy e suas aplicações.** Londrina: UEL, 2007. 61p. Monografia (Graduação) – Graduação em Ciência da Computação, Universidade Estadual de Londrina; Londrina, 2009.
- LIMA, R. P. G.; SOUZA, C. P.; Arruda, B. W. S.; **Experimental Platform for Faults Detection in Fuzzy Controllers Based On Artificial Immune Systems.** International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Proceedings of International Instrumentation and Measurement Technology Conference on. P. 593 596, May, 2013.

MALUTTA, C., **Método de apoio à tomada de decisão sobre adequação de aterros sanitários utilizando a Lógica Fuzzy**. Florianópolis: UFSC, 2004. 136 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PONSONI, V., **Modelagem de Sistemas de Tempo Real Utilizando UML Real Time**. Taquaritinga: FTT, 2006. 95p. Monografia (Graduação) – Graduação em Ciência da Computação, Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga; Taquaritinga, 2006.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., **Controle e Modelagem Fuzzy**, ed. 1, São Paulo-SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 2007.

SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., **Controle e Modelagem Fuzzy**, ed. 2, São Paulo-SP, Editora Edgard Blücher Ltda, 2009.

SOUZA, Cleonilson Protásio. **Uma Arquitetura Autestável Para Circuitos Digitais Baseada no Algoritmo de Berlekamp-Massey e em Sistemas Imunológicos Artificiais**. Campina Grande: UFCG, 2005. 122 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

STIBOR, T., TIMMIS, J., ECKERT, C.; **The Link Between r-Contiguous Detectors and k-CNF Satisfiability**. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC-2006)*, v.1, p. 19, Jul 2006.

TAVARES, R.S.; BERGER, M. A.; SOUZA, C.P. **Deteção de Falhas em Sistemas de Controle Utilizando Algoritmo Imunológico**, v.1, p. 01-06, Junho 2008.

TORRES, G. L. e SILVA, L.E.B. **Estacionamento de um Veículo Utilizando Técnicas de Controle Difuzzo**, Revista Unitau, 31-38, Dez 1995.

VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY, K. Y. e KAVURI, S. (2002). **A review of process fault detection and diagnosis**. part i: Quantitative model-based methods, *Computers & Chemical Engineering* 27: 293-311, Jul 2002

ZIMMERMANN, H.J., **Fuzzy sets theory and its applications**. Boston: Kluwer, 1991.



## APÊNDICES

### APÊNDICE 1

TABELA A. 1 - EXEMPLOS DE ALGUNS TESTES REALIZADOS PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE ENTRADA DO ASN PARA AS SIMULAÇÕES

r	desvio $\epsilon$	Nd	L	CF (%) Critério r-hamming	CF (%) Critério r-contínuos
1	10	100	5	0	0
2	10	100	5	0	0
3	10	100	5	0	0
4	10	100	5	0	88,87
5	10	100	5	91,03	0
1	12	100	5	0	0
2	12	100	5	0	0
3	12	100	5	0	85,54
4	12	100	5	86,77	88,40
5	12	100	5	84,01	0
1	13	100	5	0	0
2	13	100	5	0	0
3	13	100	5	0	87,77
4	13	100	5	92,55	89,00
5	13	100	5	91,01	0
1	14	100	5	0	0
2	14	100	5	0	0
3	14	100	5	0	88,99
4	14	100	5	94,74	90,04
5	14	100	5	88,45	0
1	15	100	5	0	0
2	15	100	5	91,92	0
3	15	100	5	0	84,98
4	15	100	5	92,31	95,03
5	15	100	5	90,05	0
1	20	100	5	0	0
2	20	100	5	0	0
3	20	100	5	75,02	80,54

## APÊNDICE 2

TABELA A. 2 - EXEMPLOS DE ALGUNS TESTES REALIZADOS PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE ENTRADA DO ASN PARA OS TESTES NA PLANTA FÍSICA (PT3)

R	desvio $\epsilon$	Nd	L	CF (%) Critério r-hamming	CF (%) Critério r-contínuos
1	10	100	10	0	0
2	10	100	10	0	0
3	10	100	10	0	0
4	10	100	10	0	88,87
5	10	100	10	77,90	0
1	15	100	10	0	0
2	15	100	10	0	0
3	15	100	10	0	85,54
4	15	100	10	0	88,40
5	15	100	10	84,01	0
1	20	100	10	0	0
2	20	100	10	0	0
3	20	100	10	0	87,77
4	20	100	10	92,55	89,00
5	20	100	10	91,01	0
1	30	100	10	0	0
2	30	100	10	0	0
3	30	100	10	0	88,99
4	30	100	10	94,74	90,04
5	30	100	10	91,45	0
1	40	100	10	0	0
2	40	100	10	99,50	88,80
3	40	100	10	90,98	87,98
4	40	100	10	92,31	95,03
5	40	100	10	90,05	0

### APÊNDICE 3

TABELA A. 3 - EXEMPLOS DE ALGUNS VETORES PRÓPRIOS (SELF-STRINGS) OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES DO ASN TOMANDO-SE COMO REFERENCIAL A VARIÁVEL PRESSÃO PARA OS PARÂMETROS  $R = 4$ ,  $\epsilon = 14$  E  $L = 5$ .

4,01870	4,04200	4,06540	4,06540	4,05850
4,04120	4,04120	4,03770	3,99100	3,99100
4,01870	4,04640	4,06540	4,06540	4,05850
4,04120	4,04120	4,03770	4,03940	4,03940
4,03940	4,10690	4,16410	4,16410	4,19180
6,14290	8,11310	10,15770	12,99870	15,03470
18,07820	20,92270	24,94270	27,58640	31,76390
34,75900	34,75900	34,04750	30,48970	27,59160
24,85270	21,88880	21,60140	21,60140	22,04460
22,27830	22,51550	22,86870	23,11620	23,49880
23,49880	23,49880	23,70830	24,50470	24,96520
24,98600	24,98600	24,98600	24,67780	24,67780
25,09850	25,09850	25,09850	25,04140	24,70030
24,70030	25,04830	25,04830	25,03100	24,99470
24,99470	25,12800	25,31150	25,31150	25,31150
24,86310	25,54000	25,54000	25,59890	25,59890
25,16090	25,07950	24,83370	24,83370	24,83370
25,11240	25,11240	24,54800	24,54800	24,68820
24,70900	24,70900	25,13840	25,38250	25,38250
25,09330	24,86830	25,09330	24,95140	25,12280
25,56250	25,56250	24,85620	24,85620	24,98430
24,98430	24,41470	24,41470	24,64150	24,64320
25,14530	25,14530	24,87870	24,78860	24,63460
24,63460	25,38070	25,40670	25,38070	25,46040
25,33920	25,15740	24,98770	24,94620	24,94620
25,13490	25,13490	24,95480	24,95480	24,95480
25,08120	25,08120	24,07710	24,07710	24,72630
24,72630	24,59300	24,30560	23,91950	24,30560
24,27620	24,32990	24,32990	25,54520	25,74080
25,74080	25,37900	25,37900	25,37380	24,47700
24,47700	24,47700	24,13420	24,13420	24,75230
24,96870	25,33230	25,57460	25,57460	25,22320
24,94620	24,59470	24,90120	24,90120	25,17470
25,17470	24,75230	24,75230	24,82150	25,29590
25,29590	24,88390	24,64490	24,07360	24,07360
24,28660	24,28660	24,22770	24,22770	24,62070
24,68650	24,68650	24,51680	24,44580	23,59230
23,59230	23,83300	23,83300	22,96910	22,82880

## APÊNDICE 4

TABELA A. 4 - EXEMPLOS DE ALGUNS DETECTORES (PERTENCENTES AO CONJUNTO CD) OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DO ASN (FASE 1 DO ALGORITMO) PARA OS PARÂMETROS  $R = 4$ ,  $\epsilon = 14$  E  $L = 5$  (R-HAMMING). LEMBRANDO QUE A CADA EXECUÇÃO DO ALGORITMO É GERADO UM NOVO CONJUNTO CD DIFERENTE.

9,5595	33,5169	17,8307	44,0719	30,5544
15,8287	64,9582	42,6137	13,7449	30,7012
1,762	29,7772	38,1879	24,3243	17,7348
16,0305	32,3671	5,1034	46,9697	30,2264
21,3636	47,7785	8,2349	36,4784	9,4362
20,1393	33,6207	7,875	57,6105	16,2555
13,6752	35,7398	33,725	11,8003	39,1537
17,409	67,8982	31,1635	37,6763	14,0148
36,5736	34,7572	54,8822	15,0202	16,9283
66,6815	45,6115	17,9933	38,4474	15,1821
26,2348	16,9551	2,0574	40,4464	21,9276
32,7552	13,6236	13,4648	31,5722	30,2369
14,0955	39,1183	74,9019	32,3919	6,8614
14,1027	5,2311	30,5736	73,5459	33,9793
13,9915	45,2131	51,096	16,9445	29,1777
11,241	55,5464	31,9968	32,6644	6,1639
46,2708	17,3829	54,2611	17,8362	36,9353
11,6259	26,4034	42,9191	11,6624	20,5311
8,3907	23,3231	30,2253	33,7601	13,1634
14,398	8,0259	28,1821	54,6617	34,0865
14,5202	31,8038	5,2206	39,9704	39,6984
53,6984	14,5057	37,6118	33,215	7,2238
26,1182	1,7399	31,2579	12,7616	37,0381
75,9535	35,7679	9,4121	17,4469	32,6763
23,3849	31,8635	16,8064	31,5591	17,0747
27,6478	15,2788	4,3889	20,3235	33,0274
18,233	31,3399	48,3435	11,1883	17,3464
30,6912	34,5958	8,3961	87,2327	17,104
4,6104	28,3743	28,3283	44,3463	5,0068
15,5356	9,2763	54,5533	37,0701	23,0204
11,8055	67,911	31,3293	40,4805	17,9402
40,287	32,3902	13,002	73,4975	16,354
9,3989	52,8629	10,3323	22,4411	37,2755
16,9558	30,2013	27,9941	37,8184	7,8965
9,1842	31,4729	16,0691	22,4182	57,6886
33,746	7,8308	28,6336	40,7907	14,4973
5,3881	40,0379	25,6746	17,926	45,8831

## APÊNDICE 5

TABELA A. 5 - EXEMPLOS DE ALGUNS VETORES NÃO-PRÓPRIOS (FAULTS-STRINGS) OBTIDOS A PARTIR DAS SIMULAÇÕES DO ASN PARA OS PARÂMETROS  $R = 4$ ,  $\epsilon = 14$  E  $L = 5$  (R-HAMMING).

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
25,3392	25,1574	24,9877	24,9462	24,9462
25,1349	25,1349	24,9548	24,9548	24,9548
25,0812	25,0812	24,0771	24,0771	24,7263
24,7263	24,593	24,3056	23,9195	24,3056
24,2762	24,3299	24,3299	25,5452	25,7408
25,7408	25,379	25,379	25,3738	22,0347
21,0782	20,9227	24,9427	27,5864	31,7639
31,759	31,759	31,0475	30,4897	27,5916
24,8527	21,8888	21,6014	21,6014	22,0446
22,2783	22,5155	22,8687	23,1162	23,4988
23,4988	23,4988	23,7083	18,6045	18,6288
18,9872	18,9872	17,9311	17,7649	17,2351
17,2351	18,3951	18,8054	18,9785	18,8054
18,5041	18,2981	16,9564	16,9564	17,635
17,7458	17,7458	17,2265	16,5149	16,5149
17,5087	17,6108	17,5087	17,3407	17,197
17,197	17,6472	17,6472	17,6454	17,152
17,152	17,8272	17,9276	18,4851	18,5803
18,5803	18,5803	19,0668	20,1887	20,6197
21,1651	21,1824	21,1824	20,6111	20,6111
21,1599	21,1911	22,1519	22,2246	22,8617
24,0857	25,2544	25,7391	26,0923	26,6913
26,7519	26,8783	26,8783	26,5095	24,5393
23,5023	22,0982	21,8905	22,0982	22,6211
24,8665	25,2232	26,2775	26,326	27,2003
26,326	26,3606	26,3606	26,9302	26,9579
26,9579	26,7207	25,7703	25,5833	24,7038
24,6276	24,4562	24,4562	24,4562	25,1418
25,3184	26,0992	26,0992	24,9947	24,9947
26,3312	27,1795	27,7889	27,3734	27,3734
27,3734	28,7723	28,7723	27,9499	27,5569
26,9631	26,88	26,88	28,033	30,4915
30,9243	30,9243	28,6753	28,1161	28,1144

## APÊNDICE 6

TABELA A. 6 - EXEMPLOS DE ALGUNS DETECTORES GERADOS NA FASE 1 DO ASN PARA OS PARÂMETROS  $R = 3$ ,  $\epsilon = 30$  E  $L = 10$  (R-HAMMING, CONCATENADOS).

5,027468	13,3997	13,18911	86,06125	40,97266	11,45853	22,19854	23,64663	29,83101	2,421848
23,03749	6,359344	2,087559	21,3706	26,58896	12,00782	5,209749	24,317	55,34151	69,09584
64,49082	12,75121	12,91645	0,294545	25,64374	5,685474	16,7371	2,119098	18,02322	54,12956
28,8476	52,46679	26,89478	18,52715	8,21758	16,16035	13,07099	22,33047	24,16775	16,33003
32,29989	75,43359	3,216402	17,88736	14,03118	12,12154	10,41429	25,41327	27,47479	12,45593
81,0844	15,57708	25,76713	0,220488	86,21358	7,650995	18,98744	21,79479	31,16014	9,48105
53,27852	0,647982	86,9587	17,56294	16,26517	17,25947	9,082333	6,149674	16,11431	15,717
25,03244	52,94715	33,37512	6,896767	28,01564	3,384832	20,33835	27,19746	32,57348	3,47316
15,46026	52,45187	5,328453	10,20648	48,38363	20,68459	1,709388	16,90266	9,769823	5,292041
22,38005	16,92867	5,869372	1,206651	32,03753	18,53215	17,59607	26,50138	76,61272	11,87339
19,50833	16,64932	26,93577	60,60817	40,62011	20,0729	8,676416	12,20044	8,373356	9,180629
66,96159	4,04207	10,5693	20,73241	11,42795	82,35891	4,908436	6,021035	19,84989	7,356359
18,41033	20,9958	10,2959	10,94191	40,67732	8,866477	7,584169	72,12589	18,12612	22,04546
88,36	7,205557	0,182006	10,69462	39,65887	21,92324	22,51052	11,47344	4,709378	14,40451
17,18642	83,58745	27,2448	12,58772	15,1278	16,98986	12,51304	18,05985	29,71497	43,8765
27,46523	24,25286	27,49817	6,935015	45,81123	17,32017	19,57055	11,53013	71,18842	25,67082
15,36078	6,37872	19,71812	1,788377	59,33183	11,06918	7,9155	21,69438	36,92475	12,63892
18,08133	18,9719	20,84956	6,388651	75,91982	88,10432	11,19775	18,37924	30,59937	7,688482
9,809971	9,132961	24,2129	16,09733	46,84888	26,50449	12,76084	25,05221	34,08013	18,08212
25,70335	43,14729	9,084537	12,98812	25,55898	18,93696	15,75862	15,50721	32,04569	0,857207
27,58359	20,42381	29,42822	9,073498	21,96079	8,398668	19,926	87,85502	17,6028	10,54308
21,10068	9,78706	20,01832	17,76584	44,35885	3,268245	89,90467	19,19472	27,95465	7,898113
23,99552	5,077126	53,0305	7,193292	15,14731	2,974059	17,28746	18,78748	44,29886	15,37258
18,02353	1,060117	0,751764	29,36794	36,48832	19,47191	5,796761	22,48348	1,346417	59,29056
27,20475	25,50449	17,02877	0,807538	26,36572	0,84328	19,92962	61,52657	21,0926	16,95314
15,70829	37,2123	3,620611	13,18178	27,45499	1,513955	0,934366	27,31571	26,44736	17,78944
59,50635	18,74266	25,50203	12,26839	5,864244	11,4485	3,057776	85,25515	25,23014	19,18417
46,39354	3,267442	5,653654	14,58997	16,4535	56,49567	24,53013	5,952349	25,55799	21,32041
36,50644	7,286898	15,05372	14,19947	67,12918	15,10565	14,1334	15,95009	11,83295	11,09831
13,576	9,302495	21,09191	8,080203	28,82804	14,87999	19,95665	22,05814	22,87277	15,55029
47,16056	15,72204	21,00479	25,48733	4,287956	26,47349	17,63057	20,69812	0,771824	4,8785
24,23033	31,77824	6,779101	10,24596	39,76964	6,908749	16,68731	21,12491	22,9853	16,44558
59,46325	6,314188	8,204358	24,1029	28,81442	46,88339	25,72474	22,92228	23,19687	20,48779
19,71556	9,259841	13,70718	23,43126	29,17992	16,70607	10,74308	12,96346	70,94749	38,48547
53,32043	1,858156	5,969251	26,10578	77,59231	14,39253	0,675443	5,930082	1,210803	5,803289
36,10667	4,673642	16,44174	28,08255	7,749433	1,37408	1,775851	10,14306	16,14616	48,92589
24,41017	15,64276	23,7674	22,32051	72,41997	11,44785	13,22311	5,296917	26,97872	24,5897
74,78375	35,22107	6,534516	9,622242	27,86086	20,37173	16,46972	20,83071	24,51076	7,77826
25,16648	24,73046	1,394908	6,288192	20,46015	40,42025	5,599675	7,669228	24,49211	2,480411

## APÊNDICE 7

Pseudo-código básico referente à implementação da fase de geração dos detectores do ASN.

**Entrada 1:** Pontos-pressao;  
**Entrada 2:** Tamanho-vetor-proprio;  
**Entrada 3:**  $r$  {parâmetro de casamento}  
**Entrada 4:** desvio;  
**Entrada 5:** Numero-de-detectores;  
**Saída:** CD; {Conjunto de detectores}

Vetores-proprios = Pontos-pressao / Tamanho-vetor-proprio;

**Enquanto** (CD **não for igual a** Numero-de-detectores)

GERE ALEATORIAMENTE Detector  $d$ ;

**Se**  $d$  **for maior ou igual a**  $r$  comparando com Vetores-proprios **utilizando** desvio;  
 {comparando  $d$  com Vetores-proprios}

DESCARTE  $d$

**Senão**

ARMAZENE  $d$  em CD

**FimSe**

**FimEnquanto**

Pseudo-código básico referente a implementação da fase de monitoramento do ASN

**Entrada 1:** Vetores-proprios-passiveis-de-erros;  
**Entrada 2:** CD;

**Para**  $V_i$  pertencente a Vetores-proprios-passiveis-de-erros

**Enquanto** ( $V_i$  **não for maior ou igual a** um limiar  $r$  com CD)

Continue

**Senão**

FALHA DETECTADA

**FimEnquanto**

**FimPara**

## APÊNDICE A8

Curvas correspondente às pressões e derivadas (com trechos de anormalidades) associadas a cada sensor de medição de pressão.

FIGURA A8. 1 - CURVA DA PRESSÃO X DERIVADA DE PRESSÃO PT11 COM ANORMALIDADES

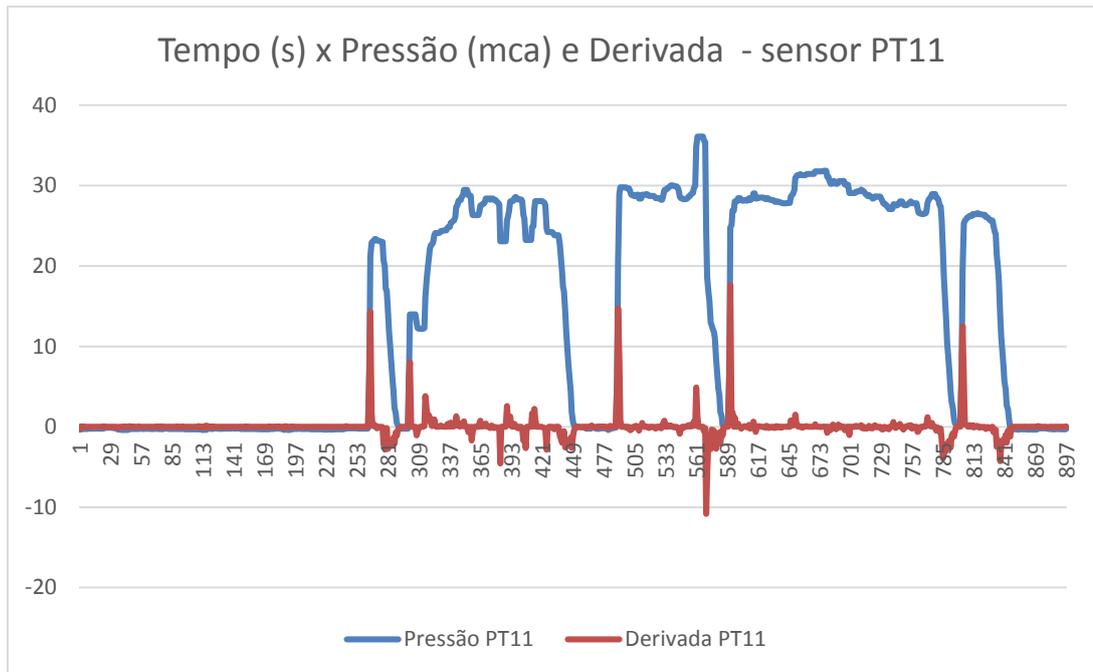


FIGURA A8. 2 - CURVA DA PRESSÃO X DERIVADA DE PRESSÃO PT12 COM ANORMALIDADES.

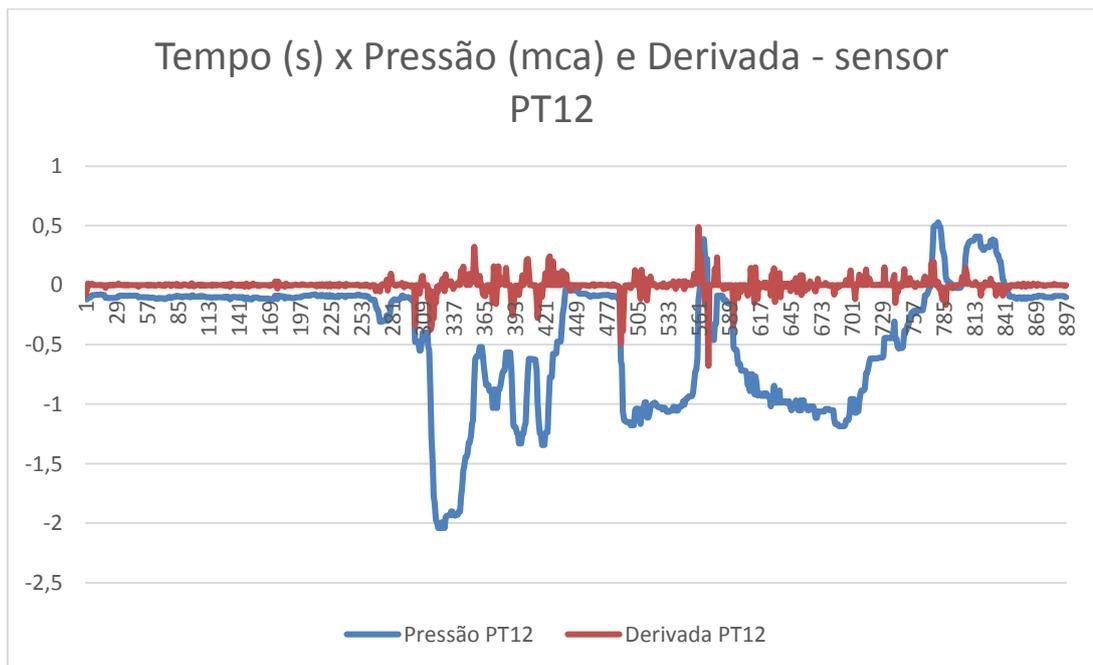


FIGURA A8. 3 - CURVA DA PRESSÃO X DERIVADA DE PRESSÃO PT21 COM ANORMALIDADES.

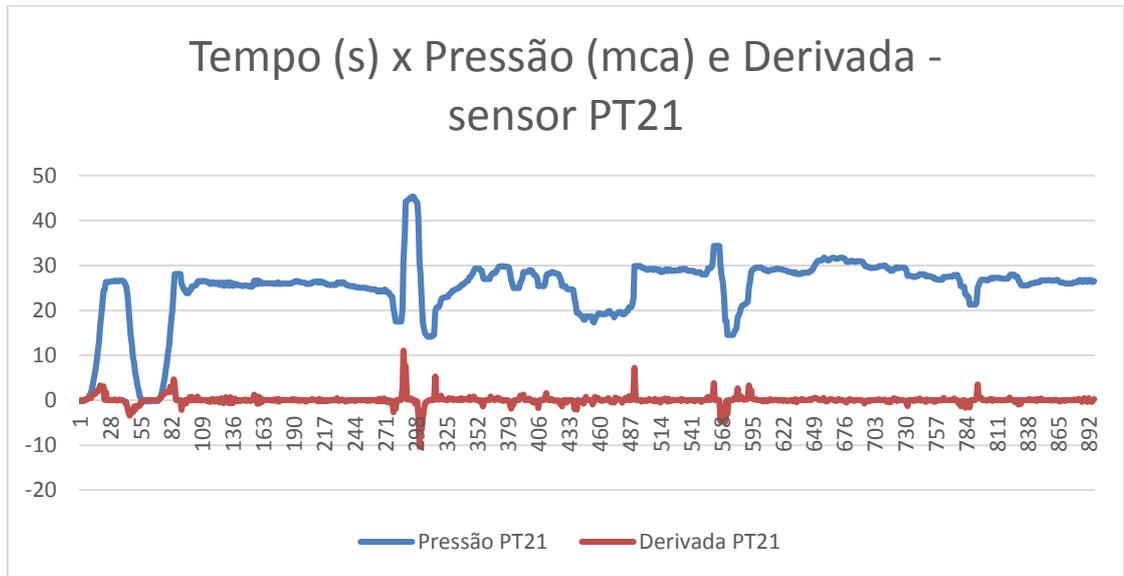


FIGURA A8. 4 - CURVA DA PRESSÃO X DERIVADA DE PRESSÃO PT22 COM ANORMALIDADES.

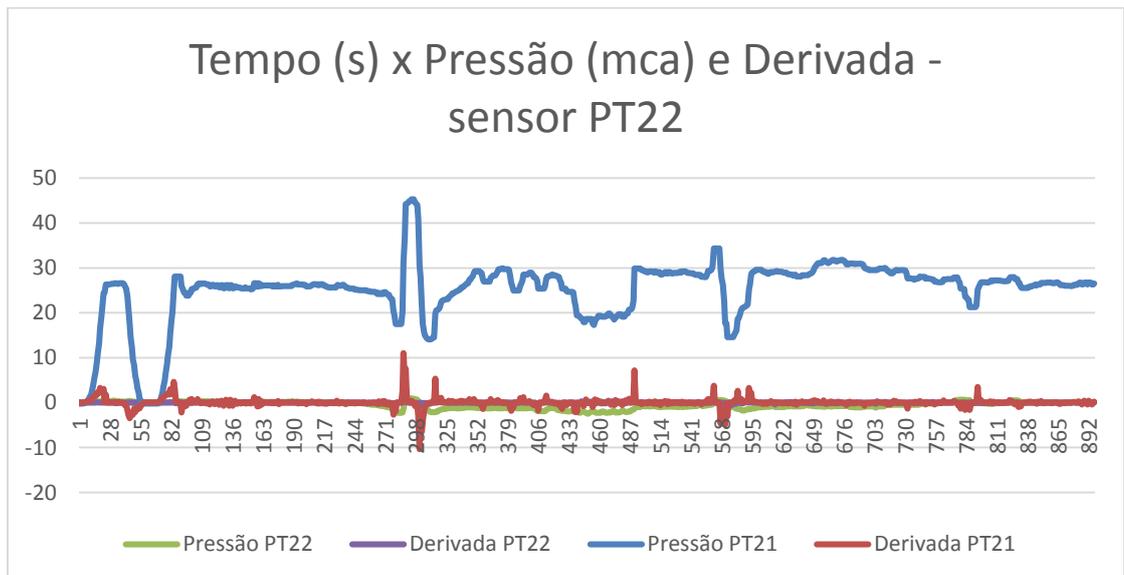


FIGURA A8. 5 - CURVA DA PRESSÃO X DERIVADA DE PRESSÃO PT3 COM ANORMALIDADES.

