

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Estratégia Baseada em Rede Neural de Base Radial Aplicada ao  
Gerenciamento da Produção de Petróleo e Gás Natural

Cleison Daniel Silva

DM 05/2008

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará - Brasil  
2008



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Estratégia Baseada em Rede Neural de Base Radial Aplicada ao  
Gerenciamento da Produção de Petróleo e Gás Natural

Cleison Daniel Silva

DM 05/2008

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará - Brasil  
2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Estratégia Baseada em Rede Neural de Base Radial Aplicada ao  
Gerenciamento da Produção de Petróleo e Gás Natural

Cleison Daniel Silva

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará - Brasil  
2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA

## PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Estratégia Baseada em Rede Neural de Base Radial Aplicada ao Gerenciamento da Produção de Petróleo e Gás Natural

Autor: Cleison Daniel Silva

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA

APROVADA EM: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

PROF. DR. CARLOS TAVARES DA COSTA JÚNIOR  
(ORIENTADOR - UFPA)

---

PROF. DR. JOSÉ AUGUSTO LIMA BARREIROS  
(CO-ORIENTADOR - UFPA)

---

PROF. DR. ROBERTO CÉLIO LIMÃO DE OLIVEIRA  
(MEMBRO - UFPA)

---

PROF. DR. WALTER BARRA JÚNIOR  
(MEMBRO - UFPA)

---

DR. PAULO ALEXANDRE SOUZA DA SILVA  
(MEMBRO - ANP)

VISTO:

---

PROF. DR. EVALDO GONÇALVES PELAES  
(COORDENADOR DO PPGEET / ITEC / UFPA)

UFPA / ITEC / PPGEET

# Sumário

<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 – Objetivo do Trabalho	2
1.2 – Organização da Dissertação	3
<b>Capítulo 2 – Província Petrolífera de Urucu</b>	<b>4</b>
2.1 – Escoamento dos campos de Rio Urucu e Sudoeste do Urucu	6
2.2 – Escoamento dos campos de Leste de Urucu e Igarapé Marta	8
<b>Capítulo 3 – Sistema de Supervisão e Controle de Urucu</b>	<b>11</b>
3.1 – Estação Central de Operação e Supervisão (ECOS)	11
3.2 – Unidades de Interface com o Campo (UIC's)	13
3.3 – Rede de Comunicação do Sistema de Supervisão e Controle	15
3.4 – Sistema Supervisório VXL	17
3.5 – Automação e Instrumentação dos Poços e Separadores	19
<b>Capítulo 4 – Medição Multifásica e Correlações</b>	<b>23</b>
4.1 – Pesquisas na área	23
4.2 – Realidade Brasileira	24
<b>Capítulo 5 – Redes Neurais de Base Radial</b>	<b>32</b>
5.1 – Introdução	32
5.2 – Estrutura das redes RBF	33
5.3 – Algoritmo de Treinamento de Redes RBF	36
5.3.1 – Treinamento semi-supervisionado ou híbrido	37

---

5.3.3.1 – Fase não-supervisionada	37
5.3.3.1.1 - Algoritmo de Agrupamento <i>Fuzzy C-Means</i> (FCM)	38
5.3.3.1.2 - Determinação das Larguras das Funções de Base Radial	40
5.3.3.2 - Fase supervisionada	41
5.4 - Determinação do número de Funções de Base Radial (RBF)	42
<b>Capítulo 6 – Resultados e Discussões</b>	<b>44</b>
<hr/>	
6.1 – Separador G: junho a setembro (Treinamento), outubro (Validação).	49
6.2 – Separador B: fevereiro a abril (Treinamento), maio (Validação).	52
6.3 – Separador G: fevereiro a maio (Treinamento), junho (Validação).	53
6.4 – Separador B: junho a setembro (Treinamento), Outubro (Validação).	54
6.5 – Separador B e G: junho a setembro (Treinamento), Outubro (Validação).	57
<b>Capítulo 7 – Considerações Finais</b>	<b>66</b>
<hr/>	
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>69</b>
<hr/>	

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1 – Localização da Província Petrolífera de Urucu</b>	<b>4</b>
<b>Figura 2.2 – Unidade Industrial de Pólo Arara</b>	<b>5</b>
<b>Figura 2.3 – Escoamento Esquemático da Produção dos poços de RUC, SUC e LUC</b>	<b>6</b>
<b>Figura 2.4 – Vista via Satélite da Região Amazônica com ênfase nas cidades de Manaus e Coari – AM e na Província de Urucu.</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3.1 – Sala de Controle da Estação do Pólo Arara</b>	<b>11</b>
<b>Figura 3.2 – Arquitetura de comunicação da ECOS com Interface Homem x Máquina</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3.3 – Estrutura da Rede de Comunicação da ECOS com Poços e Separadores</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3.4 – Gerador termoelétrico da Unidade Terminal Remota</b>	<b>2</b>
<b>Figura 3.5 – Instrumentação e Automação de poços e separadores de Urucu</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4.1 Instrumentação instalada na Cabeça dos Poços do Campo de LUC (UNBSOL).</b>	<b>25</b>
<b>Figura 4.2 – <i>Spool</i> de sensores utilizados na pesquisa da Universidade de Cranfield</b>	<b>26</b>
<b>Figura 4.3 – Resposta do Sensor de Densidade por contas de Raios Gama versus tempo</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4.4. – Resposta dos sensores Capacitância 1 e Capacitância 2 versus tempo</b>	<b>30</b>
<b>Figura 4.5 – Respostas dos Sensores Condutância 1 e Condutância 2 versus tempo</b>	<b>30</b>
<b>Figura 4.6 – Respostas dos Sensores Pressão Diferencial 1 e 2 versus tempo</b>	<b>31</b>
<b>Figura 5.1 Arquitetura básica de uma rede de função de base radial</b>	<b>34</b>
<b>Figura 5.2 - Funções de base radial que são cobertas pelo Teorema de Micchelli</b>	<b>35</b>
<b>Figura 6.1 - Alinhamento do sistema de escoamento da produção de LUC</b>	<b>46</b>
<b>Figura 6.2 - Rede Neural de Base Radial</b>	<b>48</b>
<b>Figura 6.3 – Sobreposição dos resultados da rede RBF para o conjunto de</b>	



treinamento e validação para cada uma das fases (Gás, Óleo e Água).	50
Figura 6.4 – Sobreposição dos resultados da rede RBF e da rede MLP para o conjunto de validação para cada uma das fases (Gás, Óleo e Água).	51
Figura 6.5 - Índice de correlação ( $R$ ) calculado para os dados estimados pela rede RBF para o conjunto de validação.	52
Figura 6.6 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Gás.	53
Figura 6.7 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Óleo.	54
Figura 6.8 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Água.	55
Figura 6.9 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Gás.	56
Figura 6.10 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Óleo.	57
Figura 6.11 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Água.	58
Figura 6.12 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Gás.	59
Figura 6.13 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Óleo.	60
Figura 6.14 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Água.	61
Figura 6.15 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Gás	62
Figura 6.16 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Óleo	63
Figura 6.17 - Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Água.	64
Figura 6.18 - Índice de correlação ( $R$ ) calculado para os dados estimados pela rede RBF para o conjunto de validação.	65

<b>Lista de Tabelas</b>	
Tabela 4.1 – Seqüência dos Sensores no <i>Spool</i> da Pesquisa	28
Tabela 4.2 – Resultados Qualitativos de Avaliação dos Sensores	29

## Resumo

O objetivo geral desta dissertação foi aprimorar o Separador Lógico Programável (SLP), desenvolvido em Silva (2006), utilizando a técnica de inteligência computacional de Redes Neurais de Base Radial, podendo este SLP ser integrado a um sistema de automação de poços de petróleo. Este programa objetiva o acompanhamento em tempo real das vazões de óleo, gás e água dos poços, bem como a predição da vazão em vasos separadores de um sistema de escoamento da produção de campos petrolíferos, neste caso o do Leste de Urucu – LUC, operacionalizado a partir da Base de Operações Geólogo Pedro de Moura, na Unidade de Negócios da Bacia do Solimões (UNBSOL) da Petrobras, município de COARI, estado do Amazonas.

Desta forma, esta dissertação consistiu na realização de uma modelagem Neural para estimar a relação entre as variáveis de superfície de cabeça de poço e as vazões multifásicas dos vasos separadores de teste, no campo petrolífero de LUC no estado do Amazonas. Esta relação é obtida, na prática, quando cada poço produtor é alinhado a um separador de teste para medição da produção. Os dados, obtidos quando o poço está alinhado a um separador de teste, são utilizados para treinamento de uma Rede Neural de Base Radial (RBF). Após o treinamento, a RBF reconhece padrões das variáveis de cabeça de poço (entrada da RBF) e das vazões das fases no separador (saída da RBF). O treinamento é efetuado através de um método de aprendizado híbrido, onde padrões obtidos durante os testes de produção realizados no passado são utilizados para adaptar os parâmetros da rede RBF. Os resultados obtidos nos testes mostram que a rede RBF consegue predizer os resultados dentro de uma faixa de tolerância aceitável.

## **Abstract**

This work consists of a Neural Network for modeling the relationship between the well head surface variables and the multiphase flows of the test separator vessels in the East Urucu Field (LUC). In practice, this relationship is obtained when each producing unit is aligned to a test separator for production estimation. Data were obtained when the well is aligned to a test separator. Those data are used for training a Neural Network of Radial Basis Function (NN - RBF). The goal is to make the NN - RBF to recognize the patterns of the well head variables (input RBF) and the phases flow in the separator (out RBF), through using, as the training set, the patterns obtained during the production test previously executed.

## <sup>1</sup>Capítulo 1 - Introdução

A reserva petrolífera terrestre de Urucu (Coari - AM) foi descoberta no ano de 1986, tendo sua produção viabilizada a partir de 1988. As zonas produtoras de óleo localizam-se a uma profundidade média de 2.500 m em relação à superfície terrestre. Inicialmente, o óleo produzido em Urucu era de 43 °API. Contudo atualmente produz um óleo de 50 °API, sendo o óleo mais leve processado nas refinarias do Brasil. Apesar de estar operando abaixo de sua capacidade produtiva máxima, a província de Urucu produz diariamente aproximadamente 60 mil barris de óleo de alta qualidade e 10 milhões de metros cúbicos de gás natural, fazendo do Amazonas o segundo e o terceiro maior estado produtor nacional terrestre, respectivamente, de petróleo e de gás natural.

As características do petróleo produzido em Urucu resultam em seu aproveitamento especialmente para a produção de gasolina, nafta petroquímica, óleo diesel e GLP (Gás Liquefeito de Petróleo, popularmente conhecido por “gás de cozinha”). Três unidades de processamento de gás natural (UPGN) estão instaladas em Urucu, sendo que uma delas é considerada a maior do Brasil por processar seis milhões de metros cúbicos diários de gás natural e mil toneladas de GLP. O processamento total de GLP destas unidades supera a 1,5 mil toneladas diárias, o que equivale a 115 mil botijões de 13 quilogramas.

As frações de propano e butano constituintes do gás natural são submetidas a um processo de liquefação. O gás liquefeito é transportado por meio de um poliduto, que interliga Urucu até o porto de Coari e chega à Refinaria Isaac Sabbá (REMAN) através de balsas, sendo distribuído para abastecer os estados do Pará, Amazonas, Rondônia, Maranhão, Tocantins, Acre, Amapá e alguns estados do Nordeste. Contudo, as maiores frações constituintes do gás natural são representadas por metano e etano, cuja queima é a mais eficiente dentre os hidrocarbonetos constituintes do petróleo. O emprego desses dois componentes como combustível em usinas termoelétricas e em veículos automotivos representa atualmente uma importante alternativa de energia limpa.

---

<sup>1</sup> °API: Forma de expressar a densidade relativa de um óleo ou derivado. A escala API, medida em graus, varia inversamente com a densidade relativa, isto é, quanto maior a densidade relativa menor o grau API. O grau API é maior quando o petróleo é mais leve.

Entretanto, devido à inviabilidade de transporte do gás natural por meio de balsas e à ausência de um gasoduto conectando a região produtora ao grande mercado consumidor do País (eixo Rio - São Paulo), uma parcela do metano e etano produzidos é utilizada na geração de energia e no abastecimento dos veículos utilizados como meio de transporte na própria base petrolífera de Urucu. A outra parte do gás natural produzido é reinjetada nas formações geológicas em sub-superfície.

### **1.1 Objetivo do Trabalho**

De acordo com Silva (2006) a acurada medição da produção de Petróleo e Gás Natural é um anseio não somente dos operadores dos campos petrolíferos, mas também é de muito interesse dos outros participantes na divisão das receitas sobre a lavra das jazidas. No caso dos operadores, esta medição é fundamental para otimizar a gestão sobre a drenagem dos reservatórios em produção e sobre as atividades de transferência desses fluidos. Os agentes contemplados pelo recebimento dos *royalties* têm interesses técnicos, científicos, sócio-ambientais, mas principalmente econômicos, na medição precisa dos volumes dos recursos petrolíferos produzidos.

O sistema de medição da produção é realizado em plantas terrestres ou em plataformas sobre lagos e mares, que normalmente utilizam unidades de separação das fases do fluido efluente, para posterior medição monofásica das mesmas. Para isto, utilizam medidores com tecnologia consolidada e bem aceita pela indústria. Entretanto, este sistema convencional de medição não é dedicado individualmente a cada poço, o que ocasiona lapso de tempo em que o poço não tem sua produção medida. Outras desvantagens deste sistema estão relacionadas à complexidade da instrumentação necessária a sua operacionalização, no tamanho e no peso da estrutura física do conjunto dos equipamentos que formam este sistema de medição (separadores e dutos específicos para teste, tanques, *manifolds* – encaminhadores de fluxos, bombas, válvulas, etc.), requerendo assim, bases bem sólidas para sua instalação. Esta última desvantagem eleva o custo de produção dramaticamente em campos marginais e plataformas marítimas, além de concorrer para uma maior probabilidade de acidentes operacionais e danos ao meio ambiente.

Neste trabalho, foi desenvolvido um melhoramento para o Separador Lógico Programável (SLP), proposto em Silva (2006), que pode ser integrado ao sistema de instrumentação e controle de poços petrolíferos, com o objetivo de garantir o acompanhamento contínuo da vazão das fases, em produção e/ou em teste. O SLP consiste no aprendizado e generalização da relação entre as medidas das variáveis de cabeça de poço (pressão, temperatura, etc.), e as medidas de vazão de óleo, gás e água. Esta relação é obtida, na prática, quando cada unidade produtora é alinhada a um separador de teste para levantamento da produção. Os dados obtidos quando o poço está alinhado a um separador de teste, são utilizados para treinamento de uma Rede Neural de Base Radial (RBF). Então, a RBF reconhece padrões das variáveis de cabeça de poço (entrada da RBF) e das vazões das fases no separador (saída da RBF), através do treinamento dos padrões obtidos durante os testes de produção realizados no passado. Os resultados, que serão apresentados nesta dissertação, são referentes ao campo de Leste Urucu (LUC) da Província Petrolífera de Urucu, na Unidade de Negócios da Bacia do Solimões (UNBSOL).

## **1.2 Organização da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se estruturada em capítulos da seguinte forma: no Capítulo 2, estão descritas as principais características do escoamento da produção da Província Petrolífera de Urucu, região de origem dos dados utilizados neste trabalho; o capítulo 3 apresenta o Sistema de Supervisão e Controle – SSC de Urucu, responsável pelo controle da produção dos poços e separadores daquela região; o capítulo 4 introduz noções sobre medição multifásica e medidas de correlação; na sequência, apresentam-se alguns princípios de Redes Neurais de Base Radial, no capítulo 5. O Capítulo 6 traz os resultados e discussões, enquanto o capítulo 7 traz as considerações finais.

Por último, são listadas as referências bibliográficas consultadas sobre os assuntos tratados nesta dissertação são apresentadas.

## Capítulo 2 – Província Petrolífera de Urucu

A primeira descoberta comercial de petróleo e gás natural junto ao Rio Urucu pela Petrobras, com a perfuração do poço pioneiro denominado 1-RUC-1-AM (Rio Urucu número 1) em 1986, marcou o nascimento da Província Petrolífera de Urucu, na Bacia Sedimentar do Solimões, município de Coari /AM , a 650 km a sudoeste de Manaus. Esta descoberta comercial foi decisiva para a perfuração de novos poços, que conduziram à descoberta de novos campos: LUC - Leste de Urucu (1987), SUC - Sudoeste do Urucu (1988), CRP - Carapanaúba e CUP - Cupiúba (1989) e o campo de extensão de IMT - Igarapé Marta (1990), onde este último faz parte do campo de LUC. O conjunto desses campos passou a ser conhecido como Província Petrolífera do Rio Urucu, ou simplesmente, Província Petrolífera de Urucu (Figura 2.1).

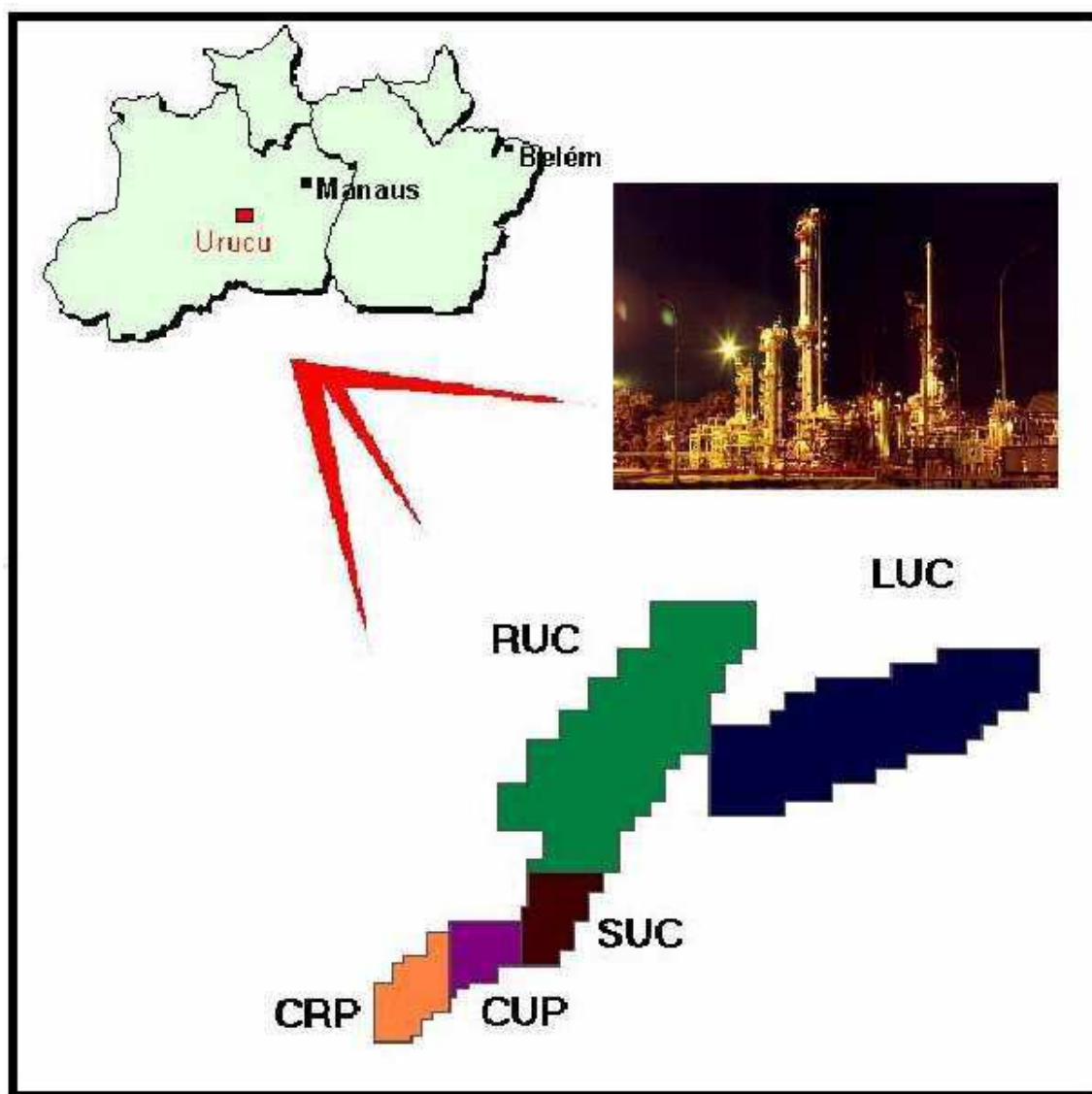


Figura 2.1 – Localização da Província Petrolífera de Urucu



Os dados iniciais do trabalho de delimitação da província petrolífera revelaram a existência de reservas significativas, justificando o início da produção. O início desta nova etapa em 1988 ocorreu após a perfuração dos primeiros poços da área, com uma produção média de 3500 barris de petróleo por dia. Estes primeiros resultados, obtidos pela empresa operadora do campo, justificaram a decisão de implantar uma infra-estrutura completa no coração da floresta amazônica. Para desenvolver suas atividades em Urucu, a Petrobras consultou renomados cientistas que contribuíram para desenvolver um plano de produção na Amazônia, sem comprometer o meio ambiente e com benefícios para a população local.

A infra-estrutura operacional e logística única no mundo, operacionalizada pela UN-BSOL (Unidade de Negócios de Exploração e Produção da Bacia do Solimões) da Petrobras, inclui a ESCOLA ESPERANÇA, aberta para toda a força de trabalho de Urucu, aeródromo, helipontos, portos fluviais, estradas, instalações administrativas e de telecomunicações, mini-hospital e enfermarias ou ambulatórios em todas as áreas operacionais, alojamentos, restaurantes, termelétricas a gás natural, estações de tratamento de efluentes e de reciclagem de lixo, viveiros de mudas, espaços de treinamento e de lazer. Tudo isso para dar suporte a um complexo sistema de produção, coleta e processamento de óleo e de gás natural, que inclui a unidade industrial de Pólo Arara (Figura 2.2), na Base de Operações Geólogo Pedro de Moura (BOGPM).



Figura 2.2 – Unidade Industrial de Pólo Arara

Atualmente, a produção da Província Petrolífera de Urucu é oriunda de poços localizados nos campos de RUC, SUC e LUC (inclusive os poços do campo de extensão de IMT), abastecendo toda a região norte do país com Petróleo e GLP – Gás Liquefeito de Petróleo.

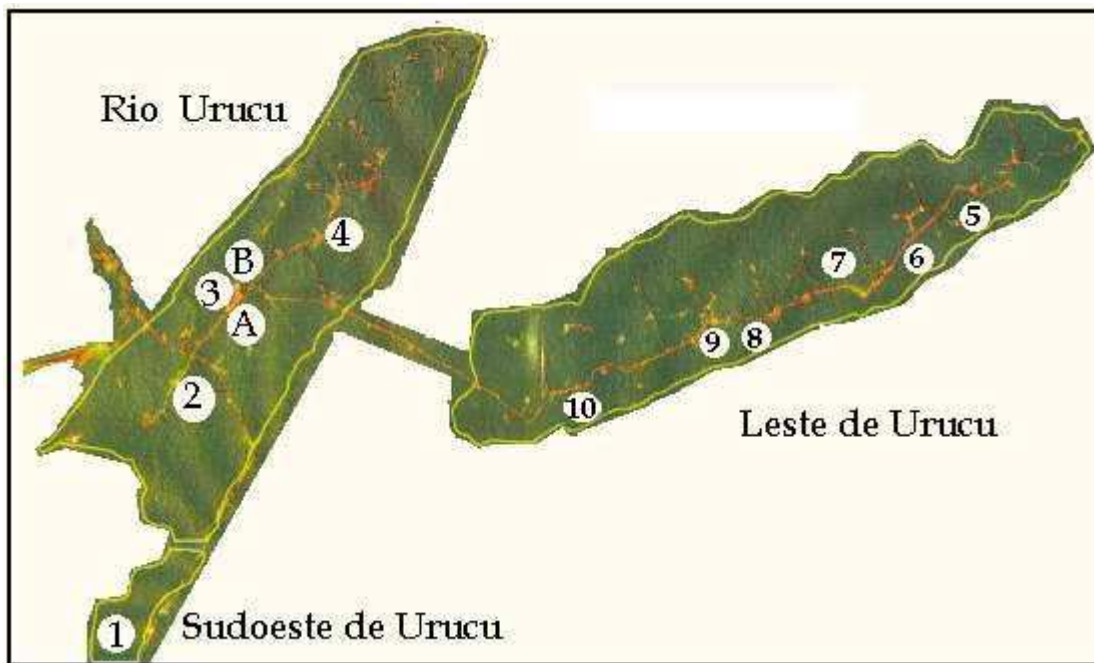


Figura 2.3 – Escoamento Esquemático da Produção dos poços de RUC, SUC e LUC.

### 2.1 – Escoamento dos campos de Rio Urucu (RUC) e Sudoeste do Urucu (SUC)

O sistema de escoamento do campo de RUC consiste de dois troncos principais de coleta, o poliduto da área oeste e o poliduto da área leste. O escoamento no sistema é multifásico; óleo, gás e água são transportados juntos até a estação do Pólo Arara. O campo de SUC, composto por apenas dois poços, é escoado através de um ramal que se interliga a área oeste do sistema de escoamento do campo de RUC.

O escoamento da área oeste (B) é realizado por um duto de 12 pol de aproximadamente 6 km de extensão, ligando o *manifold* (encaminhador de fluxo) do ponto (2) ao PÓLO ARARA (3); um duto de 6 pol como opção de produção (flexibilidade operacional); uma linha de 4,5 pol para teste de poços; uma linha de baixa

de 4,5 pol; lançador (no RUC-3) e receptor de pig (bucha de limpeza interna de dutos) na linha de 12 pol.

Na área Oeste do campo de RUC, num ponto intermediário do duto principal denominado entroncamento, a quatro quilômetros da estação Pólo Arara, temos um ramal que escoar o óleo dos poços de SUC e de alguns outros poços de RUC. Esse duto se inicia no ponto (1) e tem um diâmetro de 6 pol nos primeiros três quilômetros. Nos três quilômetros seguintes o diâmetro da linha passa para 8 pol e, depois, para 10 pol (sete quilômetros).

O escoamento da área leste do campo (A) é semelhante ao da área oeste (B), e é composto de um duto principal de 12 pol e aproximadamente 6 km de extensão, que se inicia no *manifold* do ponto (4) e vai até o PÓLO ARARA (3). Construídos paralelamente a esse duto temos um outro de 6 pol, utilizado como opção de produção (flexibilidade operacional), uma linha de teste de 4,5 pol e uma linha de baixa de 4 1/2 pol (escoamento de poços com problemas de surgência).

Os fluidos produzidos no campo de RUC são medidos na estação do Pólo Arara. As linhas do sistema de escoamento são reunidas no *manifold* principal da estação e daí cada corrente é direcionada para separação.

Todo o óleo dos campos RUC e SUC, após o separador, vai juntar-se com o óleo do campo de LUC para ser dessalgado e estabilizado. Após a estabilização o óleo segue para os tanques de transferência, e são enviados para o Terminal Solimões em Coari/AM. Ver figura 2.4

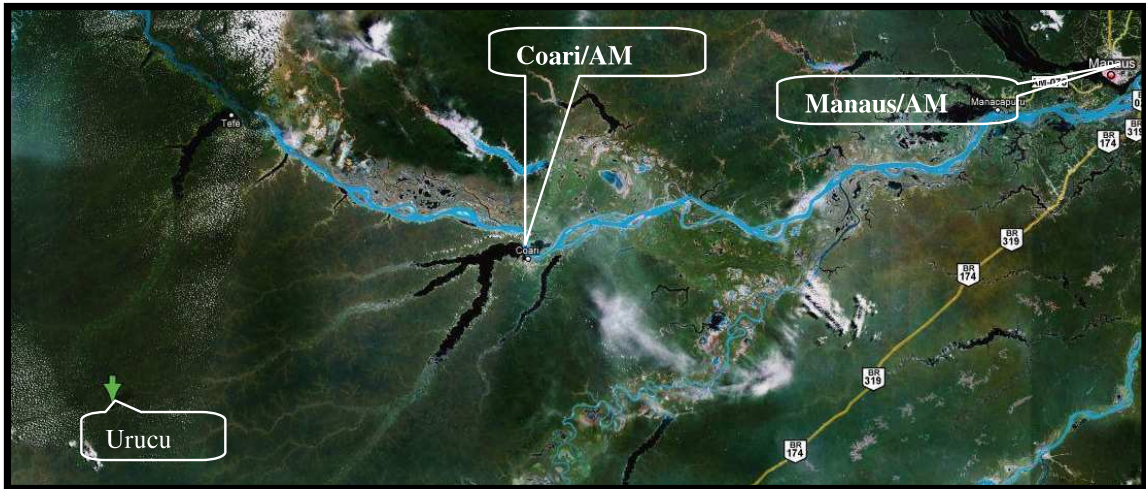


Figura 2.4 - Vista via Satélite da Região Amazônica com ênfase nas cidades de Manaus e Coari – AM e na Província de Urucu.

O gás do campo , após o separador, se dirige para o *header* da Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN). Todo o gás da estação Pólo Arara é, ao final do processo, encaminhado para os compressores centrífugos que elevarão a pressão do gás para injeção. Na saída dos compressores, a corrente de gás divide-se em duas, uma para o campo de RUC e outra para o campo de LUC. A corrente de RUC além de ser encaminhada aos poços injetores do campo de RUC será usada também para efetuar gás-lift.

Todos os poços de gás-lift têm medição local na linha de gás-lift para possibilitar o controle do volume de gás que retorna para a entrada da estação juntamente com o gás produzido.

## 2.2 – Escoamento dos campos de Leste de Urucu e Igarapé Marta

O sistema de escoamento dos campos de Leste de Urucu (LUC) e do campo de extensão a este, Igarapé Marta, é composto por seis sistemas de separação para produção e bombeamento, 02 sistemas de separação para testes, *manifolds* de produção tipo válvula rotativa multi-seletora, oleoduto e gasoduto de coleta, e lançadores e recebedores de *pigs*.



Todos os poços do campo produzem para um dos seis sistemas de separação primária e bombeamento que estão localizadas nas locações dos pontos (5), (6), (7), (8), (9) e (10) (Ver Figura 2.3). Cada sistema de separação e bombeamento é composto basicamente por um vaso separador trifásico (separador de produção) e um conjunto de bombas centrífugas, sendo que em dois desses sistemas, (6) e (10), há também uma unidade de teste (separador de teste).

Os sistemas de separação compreendem o primeiro estágio de separação óleo, gás e água da produção dos campos. O óleo proveniente destes separadores é trazido até a estação através de um oleoduto de 10”, o gás através de um gasoduto de 14” e a água é re-injetada em poços de injeção de água no próprio campo.

O oleoduto começa a partir do sistema de separação do ponto (5), recebe óleo dos separadores dos sistemas de separação, e vai até a estação coletora do Pólo Arara (3). Toda a produção de óleo do campo passa através deste duto, que tem aproximadamente 35 km de extensão.

Na Estação Coletora do Pólo Arara o óleo passa pelo segundo estágio de separação. A partir daí o óleo do campo de LUC segue até juntar-se ao óleo proveniente do campo de RUC e SUC, e juntos seguem para dessalgação, estabilização e por fim a tancagem de transferência, e daí enviado para o Terminal Solimões, no município de Coari/AM. O gás resultante deste estágio de separação segue para a *header* de gás na entrada da Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde, juntamente com as outras correntes de gás, será processado para obtenção de GLP.

O gasoduto existente entre o sistema de separação do ponto (5) e a estação coletora do Pólo Arara (3) também tem comprimento aproximado de 35 km. Este duto leva todo o gás do campo, proveniente dos vasos separadores responsáveis pelo primeiro estágio de separação. Na estação do Pólo Arara, o condensado recuperado vai para o separador juntar-se com o óleo de RUC, SUC e LUC. O gás separado é também direcionado para a *header* de gás na entrada da UPGN.

Todo o gás da estação Pólo Arara é, ao final do processo, encaminhado para os compressores centrífugos que elevarão a pressão do gás para injeção. Na saída

dos compressores, a corrente de gás divide-se em duas, uma para o campo de RUC e outra para o campo de LUC. A corrente de LUC além de ser encaminhada aos poços injetores do campo de LUC, é também utilizada para efetuar gás-lift nos poços LUC. Todos os poços de gás-lift têm medição local na linha de gás-lift para possibilitar o controle do volume de gás que retorna para a entrada da estação juntamente com o gás produzido.

## Capítulo 3 – Sistema de Supervisão e Controle de Urucu

O Sistema de Supervisão e Controle da Estação (SSC) de Pólo Arara é composto pela Estação Central de Operação e Supervisão (ECOS), das Unidades de Interface com o Campo (UIC's) e da Rede de Comunicação. Este sistema responde pela automatização e interfaces com a operação de todas as unidades da Estação de Pólo Arara e das áreas remotas, com supervisão e atuação humana de dentro da Sala de Controle (Figura 3.1), sendo aqui descrito para se entender melhor como os dados são adquiridos para o treinamento do Separador Lógico Programável (SLP).



Figura 3.1 – Sala de Controle da Estação do Pólo Arara

### 3.1 – Estação Central de Operação e Supervisão (ECOS)

A Estação Central de Operação e Supervisão é constituída por estações de operação, cada uma delas implementadas através de computador *workstation* baseado no sistema de supervisão VXL, computador auxiliar portátil e impressora para registro de alarmes e relatórios. As estações de operação são interligadas através de rede ethernet, e o software do sistema supervisorio VXL é licenciado pela *Control System International* (CSI), o qual é baseado no sistema operacional Open VMS.

A ECOS conta também com microcomputadores compatíveis com IBM-PC, para execução de tarefas auxiliares a operação e manutenção, tais como relatórios de produção, emulação de terminais, programação de controladores programáveis e tarefas administrativas. As principais características da ECOS do Pólo Arara são:

a) Comunicação com todas as UIC's, permitindo leitura e escrita de variáveis de processo, tanto analógicas como discretas, e leitura de estado operacional de equipamentos;

b) Indicação do valor das variáveis contínuas do processo tais como vazão, pressão e temperatura, em unidades de engenharia;

c) Escrita de valores analógicos para comando manual de elementos finais de controle (válvulas de controle, etc.);

d) Interface completa com os controladores, permitindo, entre outros, ajuste de valores de *setpoint*, modo de operação (manual/automático/cascata) e parâmetros de sintonia de controladores;

e) Indicação das variáveis discretas do processo, tais como, válvula aberta / fechada, equipamento ligado / desligado;

f) Emissão de comandos para ligar / desligar equipamentos;

g) Verificação de dados e execução da lógica de alarmes;

h) Emissão de relatórios periódicos ou por solicitação do operador;

i) Apresentação de telas gráficas, mostrando de forma pictórica e a cores, os principais componentes do processo, os valores das grandezas desejadas, o estado operacional de equipamentos e representando através de cores distintas e convencionadas os alinhamentos efetuados;

j) Apresentação e registro de tendência das variáveis de processo;

l) Registro de alarmes e ações do operador; e

m) Arquivo histórico de dados.

A implantação de novos processos e ampliação dos existentes, faz com que tenhamos uma série de atividades de manutenção da ECOS, dentre elas, podemos ressaltar:

a) Desenvolvimento, alteração e configuração das Telas de Sinópticos da ECOS, com seus respectivos comandos e exibições de valores, utilizando o Software VXL para ambiente OpenVMS;



b) Desenvolvimento, alteração de Gráficos de Tendência e Relatórios Operacionais e Gerenciais utilizando dados reais e históricos das informações de processo;

c) Armazenamento das Informações Históricas de Processo no Servidor de Banco de Dados ORACLE/RDB; e

d) Configurações gerais que se façam necessárias no software básico e nos computadores da ECOS VXL.

### **3.2 – Unidades de Interface com o Campo (UIC's)**

As Unidades de Interface com o Campo são compostas por controladores lógicos programáveis (CLP) que transmitem para a ECOS, através de enlace de comunicação existente, todas as informações do campo e aceitam comandos da operação, permitindo, assim, a completa operação dos instrumentos a partir da ECOS. As UIC's principais, que fazem parte do SSC da Estação Pólo Arara, são:

a ) CLP de Controle das UPGN's (Unidades de Processamento de Gás Natural): controla e operacionaliza os principais processos das UPGN's;

b) CLP's de Intertravamento da UPGN's: executa as respectivas lógicas de intertravamento, respondendo pelas funções de segurança operacional;

c) CLP de Controle da Separação e Utilidades: executa os programas de automatismo, como, por exemplo, de seqüenciamento, e algoritmos de controle PID;

d) CLP de Intertravamento da Separação e Utilidades;

e) CLP do Sistema Elétrico: incorpora as interfaces de comando e monitoração dos equipamentos elétricos e dispositivos da rede elétrica;

f) CLP's dos Turbo-Geradores: responsáveis pelo controle e operação dos geradores de eletricidade a gás natural;

g) CLP dos Geradores de Emergência: responsável pelo sincronismo e pela entrada automática dos geradores de emergência (movidos a diesel) em caso de falha no sistema de geração elétrica dos Turbo-Geradores;

h) CLPs dos Turbo-Compressores de Reinjeção: responsáveis pelo controle e operação do sistema de reinjeção de gás nos poços;

i) CLP do Turbo-Expansor: controla e opera o equipamento que reduz drasticamente a temperatura e aumenta a pressão dos gases processados;

j) CLP's dos Compressores de Propano: responsáveis pelo controle e operação do sistema de refrigeração dos processos das UPGN's;

l) CLP do Sistema de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA) do Terminal do Solimões; e

m) CLP da Medição Fiscal: responsável pelo controle das medições fiscalizadas pela ANP.

A interface entre esses CLP's e a ECOS segue as mesmas filosofias de configuração adotadas para todo o sistema existente. Particularmente, deve ser observado que a lógica de tratamento de alarmes, inclusive de sinais analógicos, é executada nos respectivos CLPS, sendo transmitidos para ECOS os bits de alarmes e recebidos da ECOS os bits de reconhecimento.

Os CLP's são de fabricação da Rockwell, família PLC-5, e recebem a terminação de toda instrumentação constante das instalações da ESTAÇÃO PÓLO ARARA. Esses instrumentos são, por exemplo, transmissores, chaves, subsistemas especiais, tais como, computadores de vazão, cromatógrafo, etc, sobre os quais é executada a aquisição de dados do campo, bem como, válvulas de controle, e de bloqueio, entre outros, os quais são acionados pelo CLP.

As válvulas motorizadas são incorporadas à rede de comunicação do SISTEMA DE TELECOMANDO DE VÁLVULAS MOTORIZADAS existente, do fabricante Rotork, e são interfaceadas com o CLP DE CONTROLE DA SEPARAÇÃO E UTILIDADES através de enlace de comunicação serial existentes (serial e radio-frequência).

As atividades mais comuns de manutenção das UIC's são:

a) Desenvolvimento, Alteração e Configuração dos programas LADDER dos CLP's para adequação aos novos instrumentos, utilizando o Software RS-LOGIX;

b) Desenvolvimento e Configuração de programas LADDER dos novos CLPs observando modificações nos processos, utilizando o Software RS-LOGIX;

c) Integração de todos os novos módulos, inclusive a comunicação com subsistemas inteligentes, tais como Computador de Vazão da Medição Fiscal,

Comatógrafo, Sistema Enraf de Medição de Nível das Esferas de GLP, Sistema ROTORK para as novas Válvulas Motorizadas, Sistema de Monitoração e Sinalização, Comando e Controle do novo Turbo Gerador; e

d) Testes dos Cartões de Comunicação dos CLPs com os dispositivos externos.

Para realização destes trabalhos são respeitados os seguintes Padrões Petrobrás: Padrão de Mapeamento de dados de transferência entre CLP's e ECOS; Padrão de Identificação de pontos de I/O usados nos CLP's; c) Padrão de Comentários internos de programas LADDER e Padrão de Estruturas de programas LADDER.

### **3.3 – Rede de Comunicação do Sistema de Supervisão e Controle**

A REDE DE COMUNICAÇÃO é do padrão ETHERNET redundante com switches automáticos para 10/100 Mbps, que interliga os equipamentos entre a ECOS e as UIC's, através de dois segmentos com encaminhamentos diferenciados. Nos trechos no campo, é usado ethernet com switches 100B-T (100 base T) e, no ambiente da casa de controle, par trançado 10B-T (10 base T).

As Estações de Operação estão interligadas entre si, e a vários PLCs através de uma rede Ethernet utilizando os protocolos DECnet e TCP/IP respectivamente. Para o intercambio de informações com os PLC's foram utilizados os drivers de comunicação GE-Fanuc (VXLHCTDRIVER) e Interchange for Allen Bradley, pertencentes ao Sistema Scada.

Os Relatórios do Sistema foram desenvolvidos separadamente em ambiente Windows NT Workstation, em PCs HP, os quais funcionam como Servidores de Relatórios de Produção.

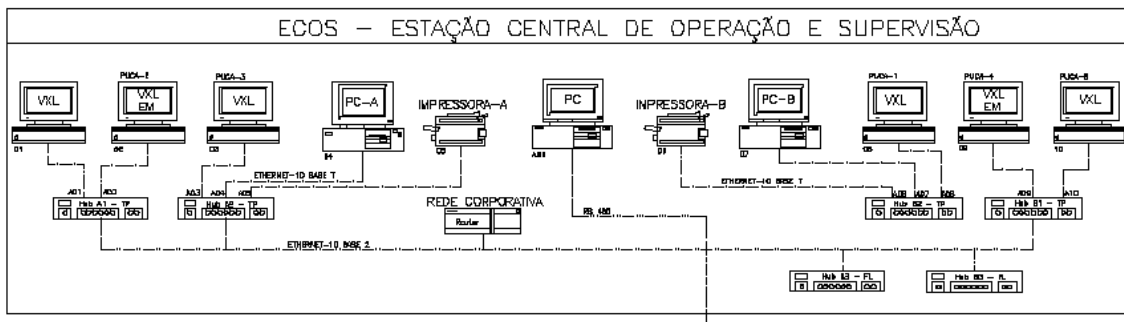
O Sistema Operacional OpenVMS fornece recursos para que o Sistema ECOS execute de maneira segura e eficiente as diversas funções de controle de processo, o que agrega ao sistema uma grande capacidade e habilidade de compartilhar e organizar tarefas concorrentes.

A comunicação entre os diferentes níveis de dispositivos do Sistema de Supervisão e Controle segue o seguinte padrão:

- a) Comunicação entre os CLPs: Se dará pela rede DH+;
- b) Comunicação entre as Estações IHM e Scada VXL: Se dará pela rede Ethernet, utilizando o protocolo de comunicação DECnet; e
- c) Comunicação entre os CLP e Scada VXL: Se dará pela rede Ethernet, para tanto estão inclusos na IHM os seguintes drivers:

- GE Fanuc - Custom External (VXLHCTDRIVER): Driver da placa de rede Ethernet, que opera no protocolo TCP/IP da Plataforma OpenVMS, responsável pelo gerenciamento da rede em nível de informações, detecção de erro, etc.
- AB - Allen Bradley A-B PLC-5: Driver da placa de rede Ethernet, que opera no protocolo TCP/IP da Plataforma OpenVMS, responsável pelo gerenciamento da rede em nível de informações, detecção de erro, etc. Este software utiliza um conjunto de API's que montam uma mensagem no formato exigido pelo CLP. Por exemplo, o driver de comunicação Ethernet faz leituras e escritas ao CLP, porém seu único trabalho é especificar o tipo de operação (leitura ou escrita), o endereço desejado e a quantidade de palavras, e informar estes dados ao InterChange, que montará uma mensagem ao CLP. Aqui se fará a configuração dos grupos de dados que serão acessados pela IHM. Toda vez que a IHM desejar ler ou escrever uma informação no CLP, enviará um comando a este driver, que o interpretará e enviará um comando ao InterChange.

O Sistema ECOS foi desenvolvido em ambiente operacional OpenVMS utilizando o Scada VXL, em 07 Computadores, das quais 05 modelo Personal WorkStation 500a, e 02 Alpha Server, que realizam a Interface Homem x Máquina (IHM) para a Supervisão e Operação do Processo, conforme mostra a Figura 3.2.



Nas Estações de Trabalho é executado o Controle Operacional do Sistema de Supervisão ECOS, desenvolvido através do SCADA VXL, permitindo ao operador monitorar e atuar no processo.

As Estações de Operação estarão dedicadas para o trabalho operacional de Cadastros, Sinópticos e Gráficos. Os relatórios serão gerados em outro Aplicativo desenvolvidos em plataforma Windows NT, porém, todos os dados serão lidos diretamente das Estações Servidoras gerados pelo Aplicativo da ECOS em arquivos com extensão “.DAT”. Como funções principais da Interface Homem x Máquina, verifica-se:

- a) Monitorar variáveis de processo em tempo real;
- b) Anunciar, reconhecer e editar alarmes com emissão de mensagens, alteração cor / forma de objetos ou textos;
- c) Sinalizar o estado operacional dos equipamentos;
- d) Ligar/desligar equipamentos;
- e) Parametrizar controladores;
- f) Registro de eventos;
- g) Gerar gráficos de tendência de variáveis de processo; e
- h) Registro histórico de variáveis de processo e de alarmes.

### **3.4 – Sistema Supervisório VXL**

A interface Homem x Máquina está estruturada através de uma série de telas e janelas. Uma tela ocupa todo o espaço disponível para exibição no monitor, enquanto que uma janela ocupa apenas uma porção deste espaço, sendo exibida sobreposta à tela. Telas e janelas são classificadas segundo o tipo dos dados nelas apresentados. As principais Telas são de Processo, Utilidades, Sistema Elétrico e Unidades Utilitárias e Parametrização de Instrumentos. As Janelas mais usadas são de Comandos para Equipamentos.

A Proteção de Acesso ao sistema supervisório consiste em um esquema de Contas de Usuários e Senhas que permite somente pessoas cadastradas a acessarem

às Telas do Sistema ECOS via VXL. Quando a IHM é ligada será apresentada uma tela inicial onde será necessário entrar com o nome e senha do usuário para prosseguir para as demais telas do sistema. A finalidade deste sistema é minimizar a possibilidade de alteração da qualidade do produto, efetuada através de manipulação indevida de ajustes do sistema. Para tanto será criada em cada linha uma lista de usuários cadastrados, cada um possuindo sua senha, que será mantida pelo supervisor da linha (ou pessoa autorizada para tal).

Os níveis de acesso dos operadores, supervisores e demais pessoas autorizadas são definidos conforme o padrão do Sistema ECOS de Pólo Arara, conforme a inicialização do sistema supervisorio VXL. A partir deste momento o Sistema Operacional OpenVMS verificará se a conta existe em um arquivo chamado UAF (*User Authorization File*), em caso positivo apresentará o menu denominado SESSION MANAGER. No caso de recusa do USERNAME e/ou PASSWORD o usuário deverá entrar em contato com o Gerente do Sistema.

O processo de *LOG OFF* refere-se ao procedimento de parada do Aplicativo. Sempre que um novo usuário for utilizar o sistema, deverá dar o Log Off do usuário anterior e então dar o seu Log On. O Sistema Operacional irá executar a parada do Processo da conta do usuário, para que um novo usuário possa se “Logar” no Sistema.

A navegação na IHM se fará através de ícones, selecionáveis através do mouse ou do teclado por uma tecla de função correspondente. O acesso às diversas telas e janelas é feito através de comandos de paginação, acionados mediante a seleção do dispositivo de indicação dos objetos de paginação disponíveis em cada tela. Os objetos de paginação podem ser botões específicos para esta função. Os botões são classificados de acordo com o tipo de paginação que pode ser executado. Assim, existem botões para paginação hierárquica (possibilitam o acesso a telas seguindo a organização hierárquica) e botões para acesso direto a determinadas telas. Existe ainda um botão específico para o fechamento de janelas.

### 3.5 – Automação e Instrumentação dos Poços e Separadores

O Sistema ECOS, desenvolvido em sistema de supervisão VXL e ambiente operacional Open VMS, operacionaliza e supervisiona poços e separadores, inclusive em localidades remotas na Província Petrolífera de Urucu. As Estações de Operação estão interligadas entre si, e a vários PLCs através de uma rede Ethernet utilizando os protocolos DECnet e TCP/IP, respectivamente; estando em comunicação com os poços e separadores através de sistema de rádio frequência com antenas no Pólo Arara (Petrobras/Sertel) e nas localidades de poços e separadores, enquanto que os PLC's dos poços Rmaster (poços de RUC e SUC) e Lmaster (poços de LUC e IMT), e o PLC do sistema de separação da área leste de Urucu comunicam-se através da rede DH+. A estrutura da rede de comunicação é mostrada na Figura 3.3.

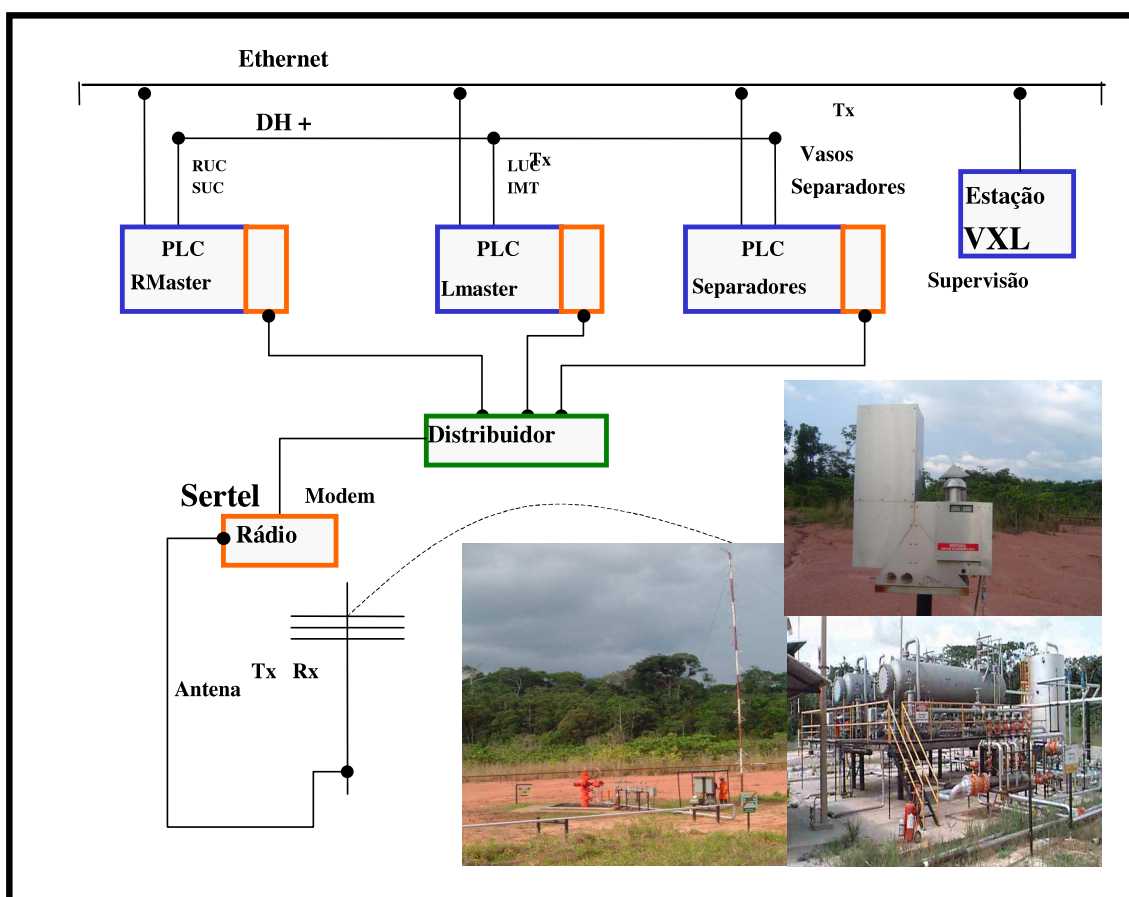


Figura 3.3 – Estrutura da Rede de Comunicação da ECOS com Poços e Separadores

A estratégia de instrumentação e automação remota de poços e separadores na província petrolífera de Urucu considera a instalação de equipamentos e dispositivos com a finalidade de provimento próprio de energia, controle, segurança e acompanhamento de variáveis do processo à distância.

O sistema remoto para os poços consiste de um gerador termoelétrico (TEG), mostrado na Figura 3.4, baseado na derivação do sistema de gás de instrumentos operado com 100 psi. A pressão da derivação é regulada por válvula redutora para a pressão de trabalho do TEG (4 psi). Através de um piloto, o sistema transforma a energia do gás em energia térmica, e desta em energia elétrica para alimentar a Unidade Terminal Remota (UTR) com 24 Vcc.



Figura 3.4 – Gerador termoelétrico da Unidade Terminal Remota



A Unidade Terminal Remota (UTR) é composta basicamente de Fonte retificadora, CLP SLC-500, Módulos de entradas e saídas de sinais analógicos e digitais, Sistema de Comunicação de Rádio via Antena Rx e Tx e Modem. A UTR interliga-se através de um multicabo de instrumentação, com uma caixa de junção, e esta com os instrumentos que estão conectados ao processo para monitoração das variáveis.

O processo é controlado por *ladder* instalado no CLP local, e como as informações processadas são transmitidas pelo rádio através de uma antena para a sala de controle do Pólo Arara, os especialistas supervisionam e, se necessário, enviam comandos novos de controle para o CLP local através da ECOS pela interface Homem x Máquina (IHM). A Figura 3.5 mostra um arranjo remoto típico para poços de Urucu.



Figura 3.5 – Instrumentação e Automação de poços e separadores de Urucu

Este sistema permite o controle e a supervisão de unidades de medições trifásicas, ajuste da abertura do poço, fechamento/abertura rápida do poço; monitoração das variáveis de pressão/temperatura/vazão; alarmes, registro de dados históricos e caracteriza-se por deixar o sistema em segurança em caso de falha (FALHA SEGURA). Cada PLC tem a capacidade de guardar os dados do processo por 72 horas, em caso de perda de comunicação via rádio. Se por algum motivo o sistema de energia for interrompido, o sinistro será detectado, e 02 baterias de 260 Ah garantirão a autonomia do sistema até que uma providência seja tomada. Caso o problema não seja de rápida solução, ou quando da necessidade de manutenção do sistema eletrônico, um sistema pneumático convencional, que está de *stand-by*, garantirá a automação local do poço.

O sistema de instrumentação e automação das unidades de medições trifásicas é alimentado eletricamente via rede de distribuição desde a geração termoelétrica a gás natural do Pólo Arara, pois estão alinhadas ao longo da estrada principal. Adicionalmente ao sistema de instrumentação e controle de poços e unidades separadoras, a PETROBRAS instalou um sistema de câmeras de vídeo espalhadas estrategicamente na área industrial, onde as câmeras são operadas remotamente pela sala de controle do Pólo Arara.

## Capítulo 4 – Medição Multifásica e Correlações

A necessidade de reduzir o custo de produção, aliada às legislações de regulação, de segurança operacional e de preservação ambiental cada vez mais restritivas e penalizadoras, tem incentivado a formação de programas de pesquisas para o desenvolvimento de sistemas de medições mais compactos e multifásicos (medições das fases sem necessidade de separação dos fluidos). Estes projetos apresentaram como resultados, inúmeros medidores de diferentes princípios físicos, onde alguns têm precisão semelhante aos dos separadores.

### 4.1 – Pesquisas na área

Exemplos desses medidores podem ser encontrados nas pesquisas dos seguintes grupos de trabalho:

Williams (1994) que faz um resumo histórico das pesquisas com medidores multifásicos desde os anos 70's;

Letton *et al* (1997) que disponibilizam os resultados de projeto de pesquisa com parcerias entre as empresas DANIEL, FRAMO e SCHLUMBERGER;

Leggett *et al* (1998) mostram resultados de medidores multifásicos utilizados em elevadas vazões de gás;

Scott e Kvansdal (2000) mostram resultados do medidor multifásico desenvolvido em parceria entre as empresas Statoil e Kvaerner, e

Wu *et al* (2001) que publica artigo sobre a identificação de regime de fluxo multifásico utilizando redes neurais;

Frentzen *et al* (2003) que fazem um resumo da experiência de utilização de medidores multifásicos na Ásia.

As desvantagens dos medidores multifásicos: são o elevado custo do equipamento; a necessidade de calibração em faixas de operação para manter a precisão;

partes móveis nos medidores causando desgastes; instrumentação intrusiva causando diminuição da área de fluxo; e a inviabilidade econômica de redundância para o medidor. Apesar dessas limitações, existem vários sistemas de medição multifásicos em conjunto com separadores instalados pelos operadores dos campos petrolíferos nas cabeças dos poços ou em *manifolds* próximos às estações de processamento.



Figura 4.1 Instrumentação instalada na Cabeça dos Poços do Campo de LUC (UNBSOL).

#### 4.2 – Realidade Brasileira

Na realidade brasileira, onde a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) administra o monopólio da União sobre os recursos petrolíferos, ainda não são encontrados medidores multifásicos, aprovados por esta agência, aplicados na medição de petróleo e gás natural. Ressaltam-se, entretanto, os programas de pesquisas da PETROBRAS, através do CENPES ou em parcerias com outros operadores, que testam e desenvolvem medidores multifásicos .

As variáveis de cabeceira de poço para correlação, denominadas VCP nesta dissertação, estão relacionadas com as respostas dinâmicas dos sensores que fazem parte da instrumentação de superfície, ver Figura 4.1, sob as diversas condições de produção de cada poço. Portanto, aqui, para a implementação do Separador Lógico Programável

(SLP) não há a necessidade de se adicionar *hardware*, definindo um grupo único de variáveis utilizadas como entradas para o aproximador das vazões das fases óleo, gás e água. O SLP sugere a escolha das entradas do sistema, variáveis relacionadas aos tipos de sensores instalados na cabeça dos poços pelas operadoras das concessões das lavras de produção de petróleo e gás natural, Silva (2006).

O desafio de aparelhar a cabeça de poço para que esta instrumentação possa evidenciar variáveis que controlem as condições de produção e quantifiquem as fases de um mistura de fluidos, deram origem aos sensores de cabeça de poço para a medição multifásica. Os principais projetos de medidores multifásicos de aplicação ampla, que estão ainda em fase de desenvolvimento, desenvolvidos ou foram abandonados, utilizam um ou mais dos seguintes princípios:

- a) Radioativo;
- b) Indutivo;
- c) Capacitivo;
- d) Microondas;
- e) Pressão (Absoluta e Diferencial);
- f) Temperatura;
- g) Ultra-Som;
- h) Venturi;
- i) Aceleração de Coriolis; e
- j) Placas de Orifício.

Apesar da grande quantidade de pesquisas sobre medição multifásica ocorridas desde os anos 70's (Leggett, 1994), são poucas as publicações da academia ou indústria sobre respostas comparativas de sensores em *loops* de teste. Isto é devido, em grande parte, aos grandes investimentos desembolsados pelos parceiros nestes projetos.

A universidade de Cranfield , UK, publicou em artigo (Yeung & Ibrahim, 2003), o resumo dos testes realizados com vários sensores de diferentes princípios colocados em um mesmo *spool* com a presença de separador trifásico neste *loop* de teste, como mostra a Figura 4.2.

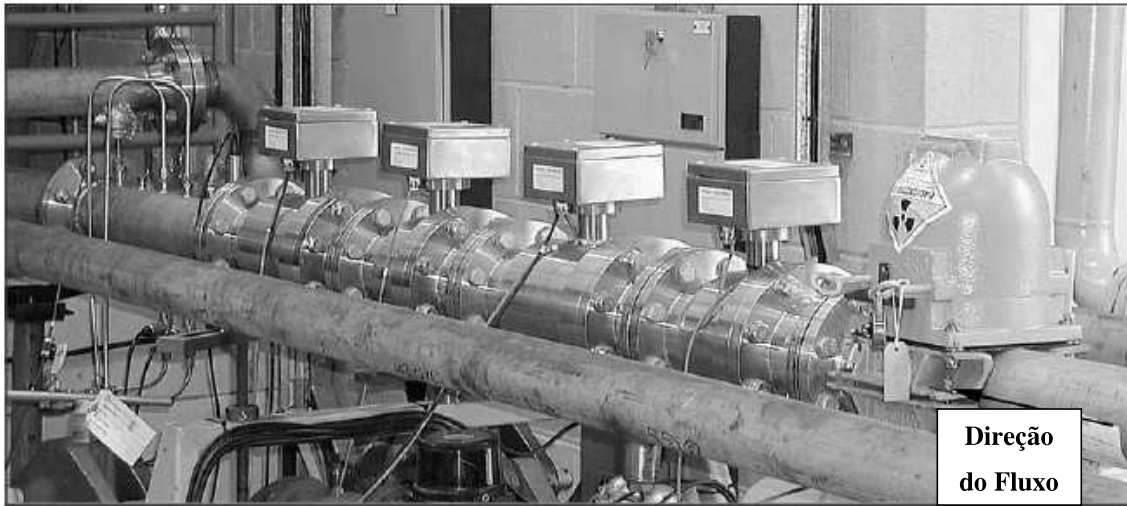


Figura 4.2 – *Spool* de sensores utilizados na pesquisa da Universidade de Cranfield

Essa pesquisa foi realizada atendendo às necessidades da indústria e das entidades acadêmicas de verificar as respostas instantâneas dos sensores de diferentes princípios físicos ao mesmo fluxo trifásico (óleo, gás e água), e foi realizada em 531 condições diferentes de fluxos. O programa de testes teve uma grande faixa de variações das condições de fluxo que, dentre outras, podemos citar:

- a) A temperatura variando de 10– 40 °C;
- b) Salinidade de água variando de 50-100 mg/l de MgSO<sub>4</sub>;
- c) Vários valores de **RGO e BSW**;
- d) O visualizador subjetivo dos padrões de regime fluxo (Perspex), foi instalado à montante do *spool* com sensores;
- e) *Spool* com sensores de 3,43 m de comprimento e pesando 400 kg, foram montados tanto imediatamente após a mistura das fases (100 mm), onde os regimes de fluxos ainda não estavam definidos; quanto distante do ponto da mistura, onde o regime de fluxo já estava determinado;
- f) Durante todo o teste foi utilizado óleo de 30 °API e Nitrogênio como fase gás;
- g) Separador de teste trifásico acoplado com tanques e bombas com velocidades controláveis; e



- h) Computador dedicado ao programa do teste fez amostragem com taxa de 4 ms.

Estas informações foram importantes para o desenvolvimento da teoria do Separador Lógico Programável, pois possibilitou tanto a obtenção de uma visão qualitativa das diversas variáveis utilizadas para a instrumentação, pela medição multifásica de cabeça de poço, nas instalações industriais petrolíferas; como também, preparou um arcabouço lógico consistente para que o SLP independesse do tipo dos sensores e do sistema de automação utilizados. Por esta razão, o resumo das informações desta pesquisa será apresentado a seguir.

Os sensores estudados na pesquisa da universidade de Cranfield, UK, para medidas de fluxos multifásicos, foram:

- i. Pressão absoluta
- ii. Temperatura
- iii. Pressão Diferencial
- iv. Condutância
- v. Capacitância
- vi. Raios Gama natural
- vii. Raios-X
- viii. Microondas
- ix. Ultrassônico
- x. Infravermelho

Estes sensores foram escolhidos, segundo os autores, devido à disponibilidade comercial e o conhecimento teórico bem sedimentado dos princípios físicos a eles relacionados. Os seguintes critérios de avaliação qualitativa foram considerados, para os quais foram dadas as notas A (bom), B (regular) e C (insuficiente):

- i. Comportamento conhecido para fluxos de óleo, gás e água.
- ii. Resposta dinâmica
- iii. Complexidade do sensor no processamento da resposta
- iv. Disponibilidade comercial

- v. Custo
- vi. Projeto não-intrusivo
- vii. Repetibilidade
- viii. Robustez

O *spool* da pesquisa para a medição multifásica consiste do arranjo mostrado na Tabela 4.1:

<b>Sensor</b>	<b>Distância ao sensor de Raios Gama (mm)</b>
1 Sensor Densidade Raios Gama	0
2 Sensor Capacitância 1	1590
3 Sensor Condutância 1	1060
4 Sensor Capacitância 2	1500
5 Sensor Condutância 2	1960
6 Transdutor para Pressão Absoluta	2330
7 Transdutor de Pressão Diferencial 1	1640
8 Transdutor de Pressão Diferencial 2	2740
9 Termopar	2840

Tabela 4.1 – Sequência dos Sensores no *Spool* da Pesquisa

Os resultados da avaliação qualitativa dos principais sensores da pesquisa da universidade de Cranfield, UK, segundo os critérios de desempenho mencionados anteriormente, estão disponibilizados na Tabela 4.2.



Sensor	AVALIAÇÃO							
	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii
Pressão Absoluta	A	A	A	A	A	A	A	A
Pressão Diferencial	A	A	A	A	A	A	A	A
Condutância	A	A	A	B	B	A	A	A
Capacitância	A	A	A	B	B	A	A	A
Raios Gama	A	B	A	A	B	A	A	B
Raios X	A	B	B	B	C	A	A	B
Ultrassônico	B	B	B	B	B	A	B	B
Micro-ondas	B	B	B	B	B	A	B	B
Infra vermelho	B	C	C	B	B	A	B	B

Tabela 4.2 – Resultados Qualitativos de Avaliação dos Sensores

Apenas parte de um dos 531 testes quantitativos foi disponibilizado no artigo. As condições deste teste foram: BSW de 45 %, fração de volume de gás de 70%, velocidade superficial do gás de 1.86 m/s, velocidade superficial de líquido de 0,74 m/s, regime de fluxo por golfadas, salinidade da água de 100 g/l MgSO<sub>4</sub>, Temperatura de 42 °C e Pressão de 5,17 bar. As Figuras 4.2 à 4.5 mostram as respostas dos principais sensores ao regime de fluxo em 8 segundos de teste.

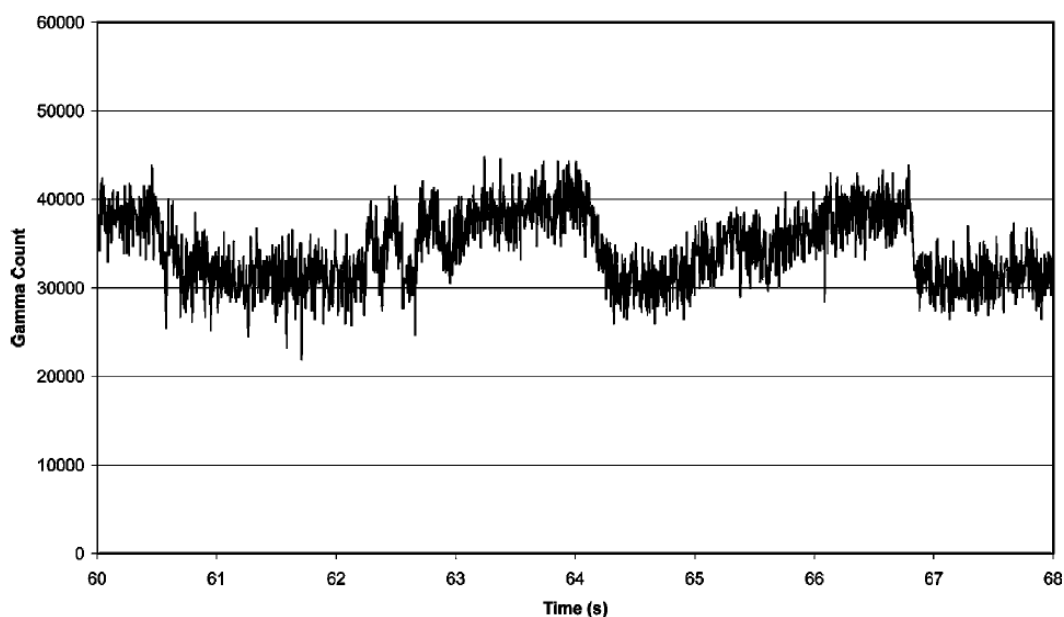


Figura 4.3 – Resposta do Sensor de Densidade por contas de Raios Gama versus tempo

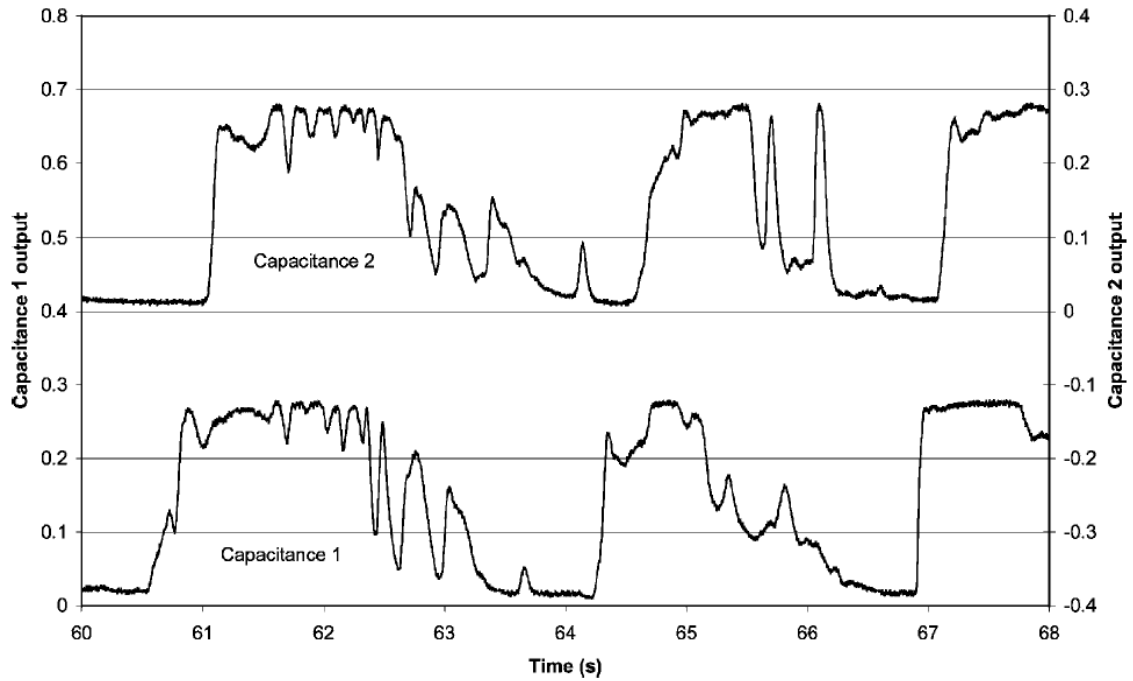


Figura 4.4. – Resposta dos sensores Capacitância 1 e Capacitância 2 versus tempo

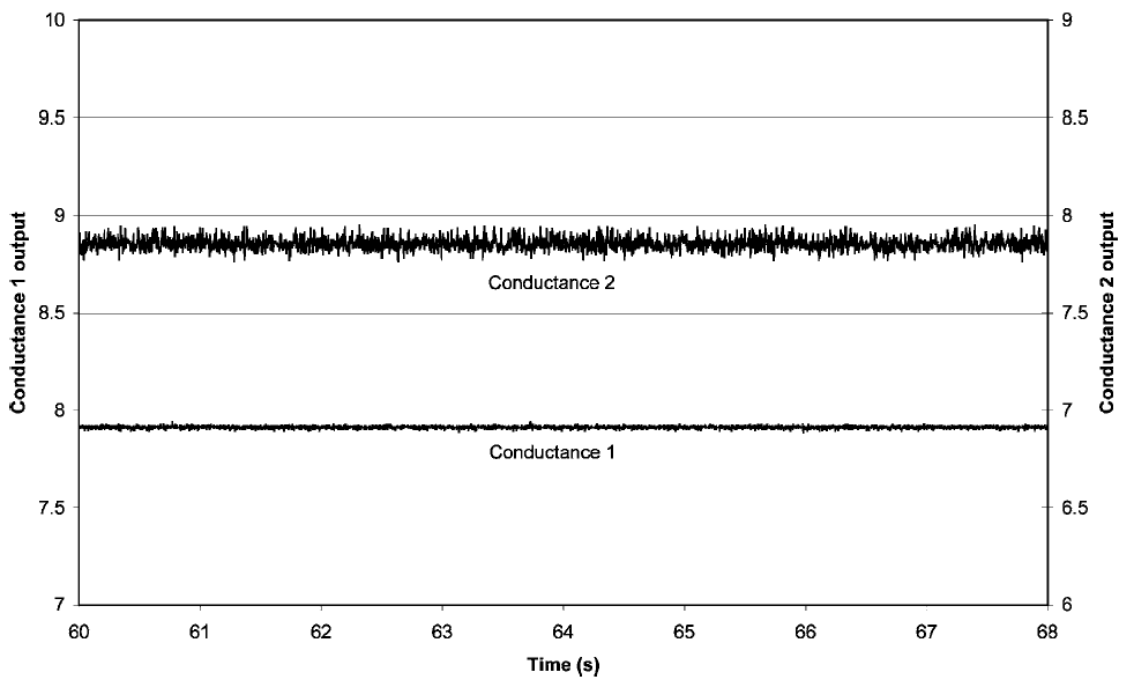


Figura 4.5 – Respostas dos Sensores Condutância 1 e Condutância 2 versus tempo

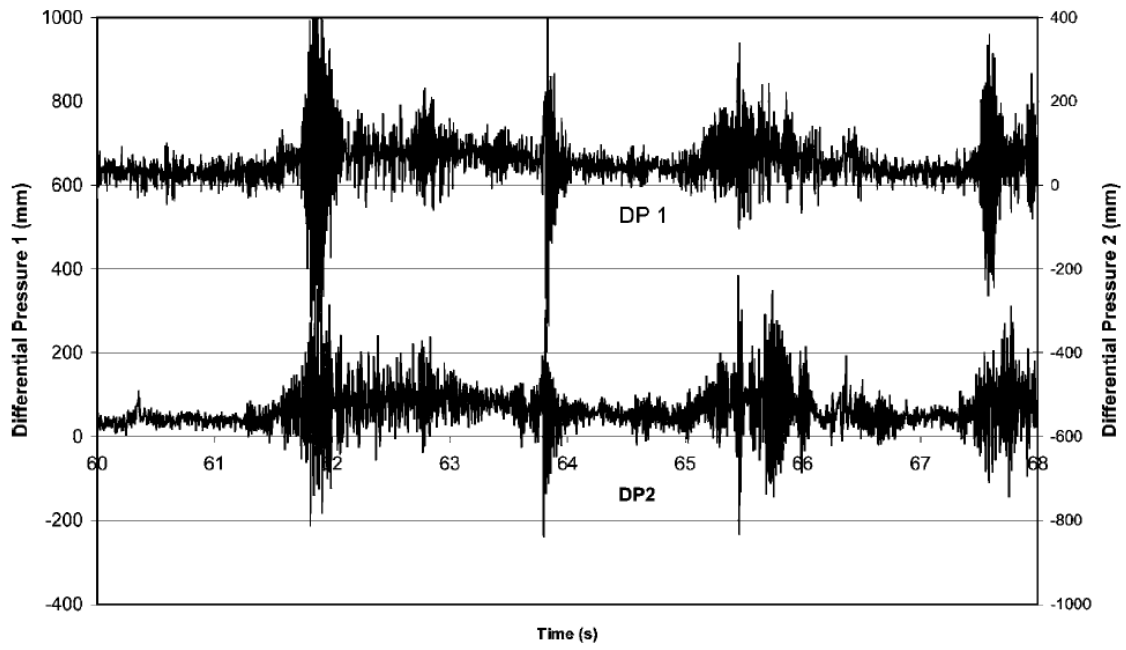


Figura 4.6 – Respostas dos Sensores Pressão Diferencial 1 e 2 versus tempo

## Capítulo 5 – Redes Neurais Artificiais de Base Radial

### 5.1 – Introdução

As redes de função de base radial formam uma classe de Redes Neurais que vêm sendo consideradas como uma alternativa de modelo não linear para problemas de regressão e classificação de padrões Barreto(2003). Grande parte desse interesse é proveniente do fato dessa arquitetura contar com um forte embasamento estatístico, podendo ser considerada um aproximador universal Haykin (2002). Além disso, possui algumas vantagens sobre outros tipos de redes, pois permite que o processo de aprendizagem de suas camadas seja desacoplado em duas etapas, o que lhe confere um desempenho de aprendizagem superior.

A construção de uma rede de função de base radial envolve três camadas com finalidades totalmente diferentes. A camada de entrada é constituída por nós fonte que conectam a rede ao seu ambiente. A segunda camada, a única camada oculta da rede, realiza uma transformação não linear no espaço de entrada para o espaço oculto, normalmente de alta dimensionalidade. A camada de saída é linear, fornecendo uma resposta da rede ao padrão de ativação aplicado a camada de entrada.

O aprendizado de uma rede RBF é equivalente a ajustar uma superfície não-linear ao conjunto de dados, em um espaço multidimensional, de acordo com algum critério estatístico. O processo de generalização equivale a usar esta superfície multidimensional para interpolar outros pontos que não pertencem ao conjunto de dados de treino, mas estejam em sua vizinhança.

Os neurônios da camada escondida de uma rede neural de RBF são formados por um conjunto de funções que constitui uma base arbitrária no espaço por eles formado, em cujo espaço o conjunto de entrada pode ser expandido. Os dados representados através de redes neurais RBF são, portanto, expandidos com referência a um conjunto finito de funções de base radial, cada uma delas centrada em uma particular coordenada do espaço multidimensional dos pontos que compõem o espaço de dados de entrada. Cada uma destas coordenadas particulares caracteriza-se por definir o centro de uma, entre várias possíveis, região de maior aglomeração de pontos do espaço de entrada.

## 5.2 - Estrutura das redes RBF

As redes neurais RBF foram originalmente desenvolvidas para interpolação de dados em espaços multi-dimensionais. Segundo B. Mulgrew, o problema da interpolação de dados pode ser assim formulado: dado um conjunto de vetores  $\{\bar{x}_i\}$  e um conjunto de escalares  $\{y_i\}$ , busca-se uma função  $F(\cdot)$ , tal que,

$$y_i = F(\bar{x}_i), \forall i \quad (5.1)$$

Desde que definida analiticamente, a função  $F(\cdot)$  pode ser usada para mapear vetores  $\bar{x}$  que pertençam ao conjunto original, no conjunto de pontos  $y$  associados. Uma possível solução para o mapeamento analítico é escolher  $F(\bar{x})$ , tal que,

$$F(\bar{x}) = \sum_i w_i \phi(\|\bar{x} - \bar{t}_i\|^2) \quad (5.2)$$

Onde  $\phi(\|\bar{x} - \bar{t}_i\|^2)$  é uma função escalar radialmente simétrica, tendo  $\bar{t}_i$  como centro. Os vetores  $\bar{t}_i$  são, por esta razão, referidos como centros no contexto de redes neurais RBF. O operador  $\|\cdot\|$  é usualmente a norma Euclidiana e mede o módulo do vetor argumento, isto é, a distância Euclidiana da ponta do vetor até à sua origem. A figura 5.1 ilustra a arquitetura básica de uma rede neural de função de base radial com mais de uma saída.

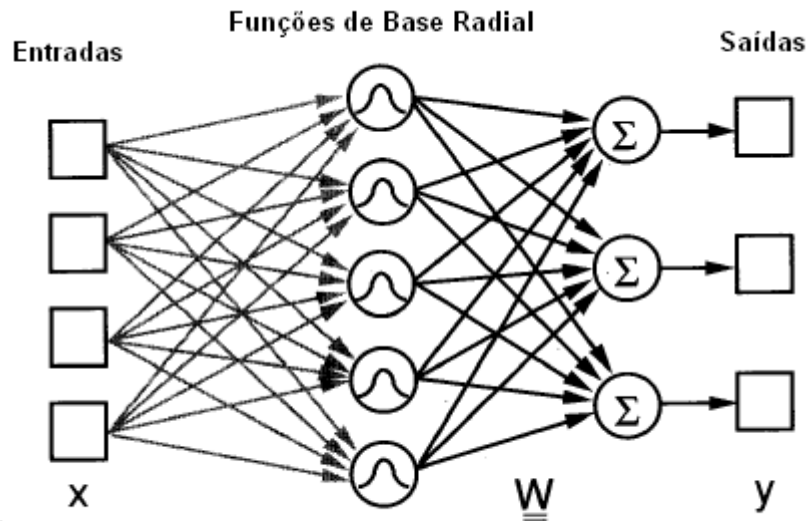


Figura 5.1 Arquitetura básica de uma rede de função de base radial

Em 1986 Micchelli indicou a existência de um conjunto de funções (tanto limitadas quanto ilimitadas) que são adequadas para interpolação por resultarem em um conjunto de equações lineares para as incógnitas  $w_i$  para as quais existe uma única solução. Há uma grande classe de funções de base radial que é coberta pelo teorema de Micchelli; ela inclui as seguintes funções, mostradas na figura 5.2, que são de particular interesse no estudo de redes RBF.

1. Multiquadrática:

$$\phi(r) = (r^2 + \sigma^2)^{1/2}, \forall \sigma > 0 \text{ e } r \in \square \quad (5.3)$$

2. Multiquadráticas Inversas:

$$\phi(r) = \frac{1}{(r^2 + \sigma^2)^{1/2}}, \forall \sigma > 0 \text{ e } r \in \square \quad (5.4)$$

3. Funções Gaussianas:

$$\phi(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \forall \sigma > 0 \text{ e } r \in \square \quad (5.5)$$

O parâmetro  $\sigma$  controla o raio de influência de cada função. Este fator é particularmente evidente no caso da função multiquadrática inversa e da função gaussiana, em que ambas as funções são localizadas e monotonicamente decrescentes ( $\phi(r) \rightarrow 0$  à medida que  $r \rightarrow \infty$ ). O parâmetro  $\sigma$  determina o quão rapidamente o valor da função de base radial cai a zero à medida que  $\bar{x}$  se afasta do centro  $\bar{t}_i$ .

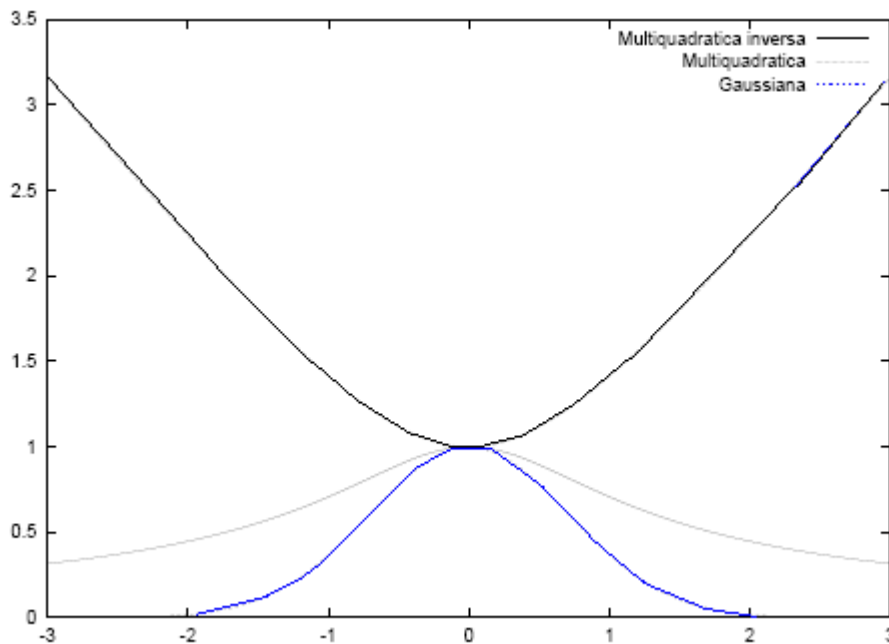


Figura 5.2 - Funções de base radial que são cobertas pelo Teorema de Micchelli

A função de base radial do tipo gaussiana é a mais comumente utilizada em aplicações práticas, e será adotada nas redes neurais RBF utilizadas nesta dissertação. Neste caso, o parâmetro  $\sigma$  é o desvio padrão da função gaussiana. Assim,  $\sigma$  define a distância euclidiana média que mede o espalhamento dos dados representados pela função de base radial em torno de seu centro.

O raio de cada uma das funções de base radial de uma rede RBF pode assumir diferentes valores, no entanto, para redes RBF reais, o mesmo raio utilizado para cada neurônio não-linear já permite que a rede uniformemente aproxime qualquer função contínua, desde que haja número suficiente de funções de base radial. Na prática, o valor do raio das funções de base radial afeta as propriedades numéricas dos algoritmos de aprendizado, mas não afeta a capacidade geral de aproximação das redes RBF.

Logo, pode-se dizer que as redes RBF se tratam de uma arquitetura flexível e poderosa. Resumindo, pode-se enumerar os seguintes parâmetros ajustáveis desse tipo de rede:

- **Número de Funções de Base Radial (RBF):** o número de funções de base radial na camada oculta está diretamente ligado à complexidade do problema a ser resolvido pela rede, e pode ser interpretado como uma maneira de controlar o nível de suavidade da aproximação;
- **Posição dos centros:** os centros das funções de base radial são determinados como parte do processo de aprendizagem. O número e posição dos centros devem compor um conjunto que seja representativo da amostra de dados;
- **Largura das RBF:** as larguras das funções também podem ser adaptadas, permitindo que a função aproximativa se adeqüe às peculiaridades do problema, como por exemplo, níveis de suavidade diferentes em regiões distintas;
- **Coefficientes lineares:** os coeficientes lineares representam os pesos que compõe a soma ponderada executada pelas unidades de saída e também devem ser determinados.

### 5.3 - Algoritmo de Treinamento de Redes RBF

A etapa de aprendizagem pode ser encarada como sendo o problema inverso de reconstrução de uma hipersuperfície, da qual se conhece apenas alguns pontos. A idéia é encontrar um mapa, ou função, que aproxime essa superfície tão bem quanto seja possível. As redes RBF, como aproximadores universais, oferecem um arcabouço para a função aproximativa. O treinamento de uma rede RBF significa, então, o processo pelo qual os parâmetros da rede são ajustados de forma que ela possa sintetizar o mapeamento original.



Na etapa de treinamento de uma rede RBF não se tem apenas como objetivo “armazenar” em sua estrutura os dados conhecidos. E sim criar um mapeamento suave que seja capaz de interpolar coerentemente em regiões onde não existam dados. Independentemente da estratégia de treinamento considerada, é desejável que a rede treinada seja validada, a fim de que se tenha uma estimativa de seu comportamento quando submetida a dados desconhecidos.

Desta forma, é comum dividir-se o conjunto de pontos conhecidos em dois grupos, chamados de conjunto de treinamento e conjunto de validação. Os pontos do conjunto de treinamento são utilizados para ajustar os parâmetros da rede. O conjunto de validação, por sua vez, só é visto pela rede já treinada, ou seja, não influencia na configuração da rede, e serve apenas como um indicador de qualidade.

Existem diferentes estratégias de aprendizagem que podem ser utilizadas, como treinamento totalmente supervisionado e treinamento semi-supervisionado ou híbrido. Nesta dissertação, o treinamento utilizado foi o semi-supervisionado ou híbrido.

### **5.3.1 - Treinamento semi-supervisionado ou híbrido**

A idéia principal dessa estratégia é desacoplar o treinamento em duas fases, uma supervisionada e outra não-supervisionada ou auto-organizada.

Na fase não-supervisionada, a posição dos centros  $\bar{t}_i$  e as larguras  $\sigma_i$  das RBF's são determinados. Com a camada oculta da rede totalmente definida, pode-se calcular o valor dos coeficientes  $w_i$  através de uma inversão de matriz.

Uma das vantagens desse tipo de treinamento é seu baixo custo computacional. De acordo com Moody e Darken, 1989, o treinamento semi-supervisionado é centenas ou milhares de vezes mais rápido do que o algoritmo de retropropagação.

#### **5.3.1.1 - Fase não-supervisionada**

Na fase não-supervisionada, define-se a posição dos centros e as larguras das funções de base radial. Nesta fase o procedimento pode ser feito sem utilizar necessariamente o vetor de resposta desejada. Pode-se adotar diferentes estratégias para a definição de ambos os conjuntos de parâmetros. Especificadamente, para o

posicionamento dos centros é possível adotar as seguintes estratégias: seleção aleatória dos centros e agrupamento dos centros.

- **Seleção aleatória dos centros:** a abordagem mais simples para se definir a posição dos centros é simplesmente escolher ao acaso alguns pontos da amostra de treinamento para cumprirem esse papel.
- **Agrupamento dos centros:** uma outra opção que pode ser mais interessante é agrupar os pontos de entrada  $\bar{x}_i$ . Assim os centros das funções de base radial são sobrepostos aos centros dos grupos formados espaço de entrada.

Assim como o posicionamento dos centros, a definição das larguras das RBF pode ser feita de várias maneiras. Uma opção, segundo Haykin (2002), é simplesmente adotar a mesma largura para todas as funções.

Uma alternativa seria a adoção de larguras escaladas individualmente para cada RBF. Funções posicionadas em regiões com menor densidade de dados receberiam larguras maiores, ao passo que aquelas posicionadas em áreas mais densas receberiam larguras menores.

Neste trabalho foram adotadas técnicas diferentes para se determinar as posições dos centros das funções de base radial e as larguras das mesmas. Para a posição dos centros, um algoritmo de agrupamento *fuzzy* conhecido como *fuzzy c-means (FCM)* foi utilizado. Para se determinar as larguras das funções de base radial uma heurística conhecida como “vizinho mais próximo” foi adotado. Essas técnicas serão descritas nas próximas seções.

#### **5.3.3.1.1 - Algoritmo de Agrupamento *Fuzzy C-Means (FCM)***

Um algoritmo de agrupamento realiza, essencialmente, a tarefa de particionamento de um conjunto de padrões em um número de grupos homogêneos, com respeito a uma determinada medida de similaridade, de modo que a partição satisfaça dois requisitos básicos: “coesão” interna e isolamento dos grupos formados. Os padrões pertencentes a qualquer um dos grupos são similares entre si, e os padrões de grupos distintos são tão dissimilares quanto possível. Na análise clássica de grupos, o

limite entre grupos diferentes é *crisp*, ou seja, “*não-fuzzy*”, tal que um padrão é atribuído a somente um grupo. Na prática, segundo Arruda e Nagai (2002), os dados não são bem distribuídos, sendo que o limite pode não ser precisamente definido. Portanto, um mesmo dado pode pertencer a dois ou mais grupos com diferentes graus de pertinência.

O algoritmo FCM requer que o usuário tenha especificado previamente o número de grupos desejado,  $c$ . Então supõe-se que haja um conjunto com  $n$  elementos. O método FCM procura a partição que minimiza a função objetivo dada em (5.6)

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m d(X_j, V_i) \quad (5.6)$$

Onde  $V_i$  é o protótipo do conglomerado  $i$ , com  $i=1,2,\dots,c$ ;  $m > 1$  é uma constante de ponderação que determina a sobreposição dos grupos;  $u_{ij}$  é o grau de pertinência com que o elemento  $X_j$  pertença ao conglomerado cujo protótipo é  $V_i$ ;  $d(\bullet)$  denota a distância Euclidiana.

De acordo com Mingoti(2003), pode ser demonstrado que a função  $J$  é minimizada quando os graus de pertinências  $u_{ij}$  são determinados como em (5.7),:

$$u_{ij} = \left[ \sum_{k=1}^c \left( \frac{d(X_j, V_i)}{d(X_j, V_k)} \right)^{2/(m-1)} \right]^{-1} \quad (5.7)$$

Onde

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m X_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad (5.8)$$

Para  $i=1,2,\dots,c$  e  $j=1,2,\dots,n$ . Para se encontrar a solução final, deve-se ter os protótipos e os graus de pertinências  $u_{ij}$  iniciais. Nos algoritmos computacionais

disponíveis, os graus de pertinências  $u_{ij}$  são gerados de uma distribuição uniforme no intervalo entre [0,1]. Os protótipos vão se modificando a cada iteração e o algoritmo é interrompido quando a distância entre os protótipos de uma iteração em relação a anterior é menor ou igual a certo valor de erro,  $\varepsilon$ , preestabelecido pelo usuário, isto é:

$$d(V_l, V_{l+1}) < \varepsilon \quad (5.9)$$

Onde  $V_l$  e  $V_{l+1}$  são os vetores que guardam os protótipos das iterações  $l$  e  $l+1$ , respectivamente.

### 5.3.3.1.2 - Determinação das “Larguras” das Funções de Base Radial

Uma vez que as posições dos centros foram determinadas pelo algoritmo FCM, é hora de especificar as larguras das RBF. A idéia é, de acordo com Kramer e Leonard (1991), atribuir valores as larguras de tal forma que o mapeamento formado pelas funções RBF seja suave e cubram os pontos de treinamento. Isto significa que qualquer ponto dentro do raio de influência dos centros deve ativar significativamente mais que uma RBF. Para se obter isso cada unidade oculta (ou RBF) deve ativar pelo menos outra unidade oculta com um grau significativo. Além disso, a largura da unidade é selecionada de tal forma que seja maior que a distância do centro de unidade mais próximo. O valor da largura, entretanto, pode ser mantido em um valor mínimo para manter a influência da unidade local e preveni-la de ter uma alta ativação oriunda dos dados de treinamento que ela não representa. Uma largura apropriada é determinada pela heurística do “vizinho mais próximo” calculada pela expressão (5.10).

$$\sigma_i = \left( \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \|\mathbf{t}_i - \mathbf{t}_k\|^2 \right)^{1/2} \quad (5.10)$$

Onde  $\mathbf{t}_k$  são os  $p$ -vizinhos mais próximos de  $\mathbf{t}_i$ . Finalmente, a saída da rede pode ser calculada.

### 5.3.1.2 – Fase supervisionada

Uma vez definidas a posição dos centros e as larguras das RBF's, de acordo com Orr (1998), pode-se considerar o modelo como sendo linear e resolver a camada de saída através de uma inversão de matriz.

É interessante notar, no entanto, que nas redes RBF o número de unidades ocultas não coincide necessariamente com o número de pontos do problema. Assim, os elementos que compõe a matriz de projeto, mostrada em (5.12), são calculados por meio da equação (5.11). Então pode-se escrever que a resposta da rede é dada pela expressão (5.13).

$$\phi_{ji} = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|\mathbf{x}_j - \mathbf{t}_i\|^2\right) \quad (5.11)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \phi_{1m} \\ \phi_{21} & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \phi_{ji} & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \phi_{n \times 1} & \cdot & \cdot & \cdot & \phi_{n \times m} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{w} \quad (5.13)$$

Como em geral  $n \geq m$ , pode-se dizer que, a equação (5.13) representa um sistema super-determinado (mais equações do que incógnitas), e o problema torna-se um problema de *ajuste*. Em Barreto(2003) é mostrado que quando se tem a *soma dos erros quadráticos (SSE)* como função custo, o vetor de pesos que minimiza SSE é dado por (5.14):

$$\mathbf{w} = \Phi^+ \mathbf{d} \quad (5.14)$$

Onde  $\Phi^+$  é a pseudo-inversa da matriz  $\Phi$  e  $\mathbf{d}$  é o vetor de respostas desejadas, obtida através da expressão (5.15):

$$\Phi^+ = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \quad (5.15)$$

Um outro parâmetro que pode ser adicionado a esta análise com o objetivo de evitar que a rede RBF sofra um ajuste excessivo é o parâmetro de regularização,  $\lambda$ . Este parâmetro serve como um indicador da suficiência do conjunto de dados fornecidos como exemplos que especificam a solução desejada. Assim, quando  $\lambda \rightarrow 0$  implica que a solução é totalmente determinada pelo conjunto de dados fornecidos como exemplos. Por outro lado, quando  $\lambda \rightarrow \infty$  significa que o ajuste deve ser sacrificado em detrimento de uma função mais simples Haykin (2002). O parâmetro de regularização está dessa forma, segundo Barreto(2003), relacionado com o grau de generalização que será alcançado pela solução na saída da rede RBF. Assim a equação (5.14) se torna a equação (5.16).

$$\mathbf{w} = (\Phi + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{d} \quad (5.16)$$

Onde  $\mathbf{I}$  representa a matriz identidade de mesma ordem que a matriz  $\Phi$ .

#### **5.4. Determinação para o número de Funções de Base Radial (RBF)**

Tanto o treinamento supervisionado como o semi-supervisionado oferecem maneiras efetivas de como se configurar as camadas de uma rede RBF. Nenhum deles, entretanto, lida com o problema de se especificar a complexidade do modelo, ou em outras palavras de se determinar a quantidade de funções de base radial na camada oculta da rede. É sabido que o número de unidades ocultas está relacionado com a capacidade computacional da rede. À medida que o número de RBF's aumenta, aumenta a também o número de funções computáveis por ela. A questão é especificar um número de RBF's que seja compatível com o problema do qual os dados de treinamento foram extraídos, Barreto(2003).

A maneira adotada nesta dissertação para atacar esse problema foi a mais simples das estratégias: tentativa-e-erro. Pode-se, por exemplo, começar com uma rede muito simples, treiná-la, e avaliar o resultado. Caso seja satisfatório o processo pode ser interrompido. Caso se deseje um maior nível de precisão, tenta-se uma arquitetura mais complexa e assim por diante.

Como estratégia de avaliação foi adotada o cálculo de correlação entre duas séries. Segundo Mingoti(2003), a correlação é uma medida adequada de similaridade para avaliar o grau de relacionamento entre duas variáveis quantitativas, pois seus valores estão sempre entre os valores de referências  $-1$  e  $1$ . Assim quanto mais próximo de  $1$ , mais indicação de que se existe um relacionamento linear positivo, e quanto mais próximo de  $-1$ , mais indicação se tem de um relacionamento linear negativo. Uma correlação próxima de zero é a indicação de que não há um relacionamento linear entre as variáveis em questão. A expressão (5.17) mostra como calcular a correlação entre duas séries.

$$R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \mu_d) \cdot (y_i - \mu_y)}{\sigma_d \cdot \sigma_y} \quad (5.17)$$

Onde  $d_i$  e  $y_i$  são o  $i$ -ésimos elementos dos vetores  $\mathbf{d}$  e  $\mathbf{y}$ , respectivamente. Os valores médios das séries são representados por  $\mu_d$  e  $\mu_y$ . Os parâmetros  $\sigma_d$  e  $\sigma_y$  são, respectivamente, os desvios padrões das séries. Por fim, é interessante notar que o coeficiente de correlação é adimensional, e logo não sofre influência de escalas de medidas entre as variáveis.

## Capítulo 6 – Resultados e Discussões

Em 2006, foi defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), a tese de doutorado intitulada "Programa de Automação Inteligente Aplicado ao Gerenciamento e Fiscalização da Produção de Poços de Petróleo e Gás Natural", a qual está baseada na definição de dois conceitos: Sistema Petrolífero de Produção (SPP) e Separador Lógico Programável (SLP). O primeiro conceito possibilitou com que as técnicas apresentadas naquele trabalho pudessem ser aplicadas no acompanhamento multifásico da produção de fluidos com características físico-químicas bem definidas. O segundo conceito consiste no desenvolvimento e na aplicação de um aproximador inteligente das vazões medidas pelos separadores de teste a partir das respostas dinâmicas das variáveis de cabeça de poço. Para isso, não há a necessidade do alinhamento contínuo do poço para as unidades de separação de teste. Isso possibilita que o SLP seja utilizado como ferramenta de acompanhamento contínuo das condições de produção para cada poço.

Esta técnica aproveita o procedimento operacional de teste dos poços que as concessionárias possuem a obrigatoriedade legal de cumprir, como o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural, definido pelas Portarias Conjuntas ANP/INMETRO N°. 1 e N°. 2. Assim, cada poço, periodicamente, é testado individualmente no separador de teste, o que torna possível inferir a relação entre as vazões das fases obtidas pelo separador trifásico e as variáveis dinâmicas de cabeça de poço através de técnicas de inteligência artificial, como por exemplo, Redes Neurais Artificiais (RNA). Como cada poço possui características próprias de produção, principalmente, por possuírem diferentes profundidades e zonas de drenagem no reservatório; o conjunto dos testes de todos os poços do Sistema Petrolífero de Produção (SPP) apresenta diferentes padrões de produção para treinamento de uma rede neural única para todo o SPP.

Nesta dissertação, intitulada "Automação Inteligente via Rede Neural de Base Radial Aplicada ao Gerenciamento da Produção de Poços de Petróleo e Gás Natural", o objetivo é, baseado na hipótese da existência do Sistema Petrolífero de Produção para o



campo de Leste de Urucu – LUC, aprimorar o Separador Lógico Programável, desenvolvido em Silva (2006). A diferença principal está no tipo de rede neural artificial (RNA) a ser utilizada. Enquanto que em Silva (2005), foi utilizada uma rede Perceptron Multicamadas (MLP, do inglês, *Multilayer Perceptron*) em conjunto com o algoritmo de treinamento conhecido por retropropagação do erro (treinamento totalmente supervisionado). Aqui foi utilizada outra classe de Redes Neurais Artificiais, conhecida como Redes Neurais de Função de Base Radial (RBF, do inglês *Radial Basis Function Networks*), descrita no Capítulo 5. Este tipo de RNA caracteriza-se por possuir uma arquitetura simples, com apenas três camadas com funcionalidades totalmente diferentes. Embora redes RBF sejam de arquitetura simples, segundo Barreto (2003), possuem forte embasamento estatístico e são consideradas aproximadores universais. O que possibilita fazer uso desse tipo de rede para aproximar o comportamento dinâmico do sistema de escoamento do campo de LUC. Outra característica que esse tipo de rede possui, é a possibilidade de realizar o treinamento para cada camada de forma desacoplada. Isso faz com que, de acordo com Haykin (2002), o tempo necessário para realizar o treinamento seja inferior, por exemplo, ao tempo necessário para as redes MLP.

Outra diferença está nos dados utilizados. Em Silva (2006), a Petrobras, através da UN-BSOL, disponibilizou, em caráter confidencial, o resumo dos testes dos 31 poços produtores do campo de LUC, no período de Junho/2003 à Dezembro/2003.

Aqui, ainda em caráter confidencial, a Petrobras disponibilizou o resumo de 278 testes dos poços produtores do campo de LUC, no período compreendido entre Fevereiro/2005 à Dezembro/2005.

O sistema de escoamento do campo de Leste de Urucu – LUC, de acordo com o Capítulo 2, caracteriza-se por possuir seis unidades de separação trifásica para produção e duas unidades para teste. Os poços ativos do campo produzem para um dos seis separadores de produção que estão nas locações I (SEP A), II (SEP C), III (SEP D), IV (SEP E), V (SEP F) ou VI (SEP H), enquanto que para o teste de produção individual são utilizados apenas os separadores de teste da locação I (SEP B) e da locação V (SEP G), conforme mostrado na Figura 6.1. As unidades de separação compreendem o primeiro estágio de separação óleo/gás/água da produção do campo. O óleo proveniente

destes separadores é enviado até a estação do PÓLO-ARARA através de um oleoduto (linhas de saída dos separadores na cor cinza), o mesmo acontecendo com o gás produzido através de um gasoduto (linhas de saída dos separadores na cor laranja), enquanto que a água é enviada para os poços injetores de água da formação (linhas de saída dos separadores na cor verde).

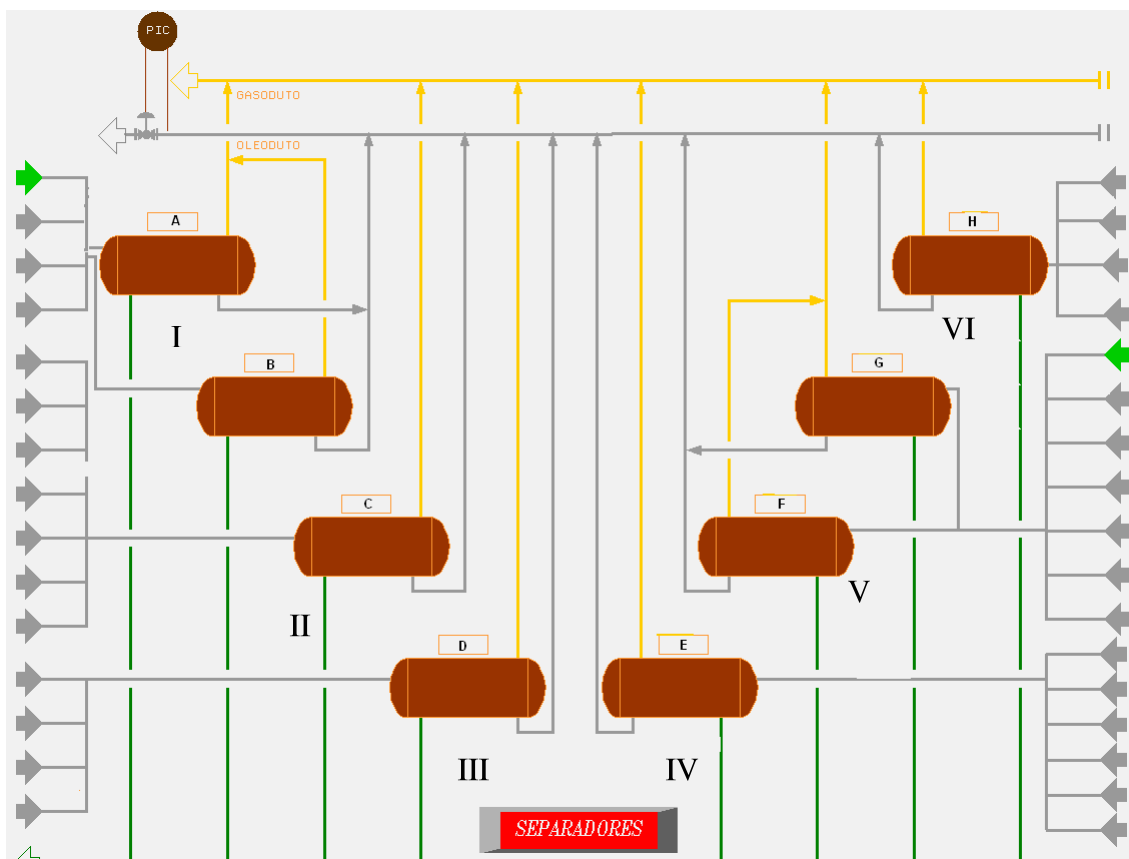


Figura 6.1 Alinhamento do sistema de escoamento da produção de LUC

Segundo a metodologia proposta em Silva (2006), o estudo dos vasos separadores de teste SEP-B e SEP-G, propiciou o aprimoramento do Separador Lógico Programável (SLP), para acompanhar as vazões de gás, óleo e água dos poços. A rede RBF, que melhora o SLP, utilizou como base de dados para treinamento, os relatórios mensais de acompanhamento dos poços do campo de LUC com testes pelos dois separadores.

Para as redes RBF, aprender significa criar uma superfície que interpole os dados de entrada e forneça respostas satisfatórias na saída. O interessante é que a rede RBF, durante a etapa de treinamento, utilize os dados dos testes dos poços conhecidos

para formar uma matriz de conhecimento. Esta matriz é composta pelo vetor de centros das funções de base radial e o grau com que os centros se relacionam, ou seja, as larguras das funções gaussianas. O que garante, também, a suavidade necessária para a resposta desejada. Estes dois parâmetros são responsáveis pela transformação não-linear que ocorre na camada oculta da rede RBF. Após esta transformação, o problema passa a ser visto como um problema de ajuste e uma pseudo-inversão matricial é utilizada, haja vista que o problema pode ser formulado como a solução de um sistema super-determinado, ou seja, que possua mais equações do que incógnitas.

Em Silva (2006), discute-se também, a possibilidade de se treinar uma rede para cada poço. No entanto, após algumas características apresentados nos resultados de ensaios de laboratórios de Pressão, Volume e Temperatura (PVT) e nas análises de densidades e grau API das fases, chega-se a conclusão de que uma RNA para todo o campo de LUC é o mais adequado. Assim, de acordo Silva (2006), as várias variações das condições de produção de todos os poços do campo de LUC são utilizadas para gerar padrões de reconhecimento das Variáveis de Cabeça de Poço (VCP) para a entrada da rede RBF, relacionando-as, aos diferentes níveis de vazões obtidos nos testes dos poços (saída da rede). Isso possibilita também que, por mais que um determinado poço não tenha sido submetido a determinadas condições de operação, durante os testes utilizados para treinamento da rede RBF, o SLP possa generalizar a partir dos pontos de operações treinados em condições semelhantes de outros poços.

As Variáveis de Cabeça de Poço (VCP) utilizadas como entrada para a rede RBF do Separador Lógico Programável são as mesmas que foram utilizadas em Silva (2006), com exceção da redução de oito para seis entradas. Neste trabalho, em razão da confidencialidade dos dados pedida pela empresa, vamos definir as variáveis sem escalas e unidades físicas, utilizando os seguintes códigos: VCP1, VCP2, VCP3, VCP4, VCP5, VCP6. Então, para a definição da topologia da rede neural, consideramos o número de seis entradas (seis VCP's) e três vazões, obtidas do separador, como saídas: vazão de gás, vazão de óleo e Vazão de água.

Foi desenvolvida uma rede RBF para o Separador Lógico Programável, contendo as características mostradas na Figura 6.2.

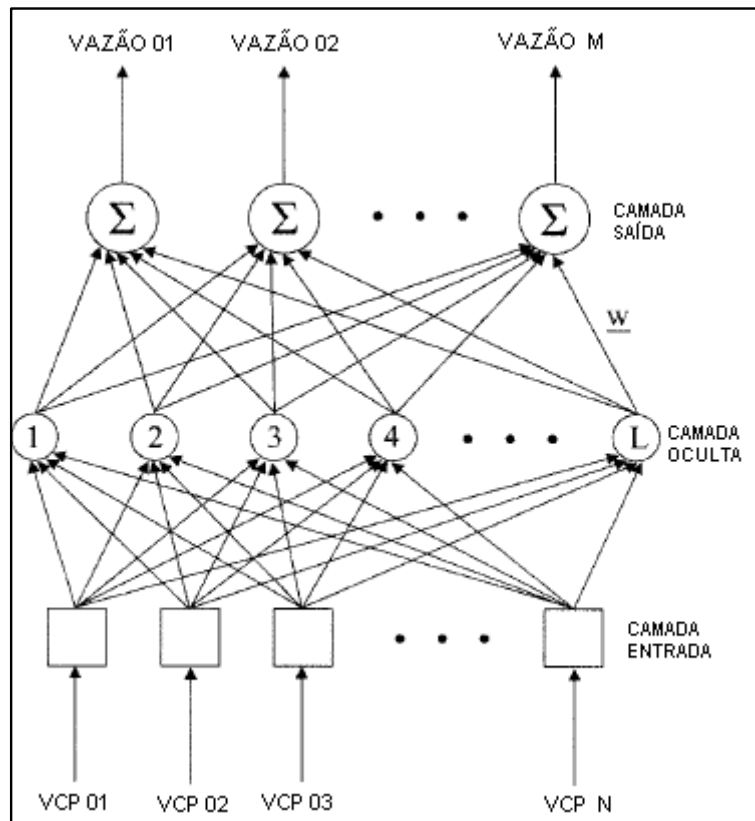


Figura 6.2 Rede Neural de Base Radial

Os parâmetros livres, ou seja, passíveis de ajustes, são a posição dos centros das funções de base (funções gaussianas), as larguras das funções (variâncias), além dos pesos entre a camada oculta e a camada de saída. Os algoritmos utilizados para determinar cada um desses parâmetros foram, respectivamente, para a posição dos centros, as larguras e os pesos, o algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM), a heurística do "vizinho mais próximo" e uma técnica de pseudo-inversão. Todos estes algoritmos estão descritos no capítulo 5, caracterizando uma estratégia de treinamento híbrida.

Com intuito de verificar o desempenho da rede RBF cinco cenários diferentes foram utilizados. Em cada um deles, os dados que compõe o conjunto de treinamento e validação são oriundos de testes de produção realizados em separadores diferentes. Ora o separador B, ora o separador G. Outra diferença está relacionada aos meses em que os testes foram realizados. Nas próximas seções serão descritos cada um dos cenários.

### **6.1 – Separador G: junho a setembro (Treinamento) e outubro (Validação) de 2003.**

Como primeiro ensaio, foram utilizados 103 pontos de dados, extraídos dos resumos dos testes de produção de 17 poços no separador G. Estes dados foram utilizados como padrões para treinamento da rede RBF. Estes padrões são os mesmos utilizados em Silva (2006), e foram obtidos entre os meses de junho à setembro de 2003. Para a validação do treinamento foram utilizados 31 padrões de entrada referentes aos testes válidos durante o mês de outubro de 2003. Ver Figura 6.3, onde são mostrados os resultados para os conjuntos de treinamento e validação, para cada uma das fases.

A Figura 6.4 mostra a sobreposição dos resultados encontrados em Silva (2006), com as redes MLP, e as redes RBF, apresentadas nesta dissertação, para o mesmo conjunto de treinamento e validação.

Uma etapa anterior à determinação da posição dos centros é a de encontrar a quantidade adequada de funções de base radial a ser utilizada. Esta quantidade determina o número de neurônios na camada oculta da rede RBF e esta relacionada com a capacidade computacional da rede, conforme Barreto(2003). Para isso, foram feitos vários testes variando apenas o número de centros da rede RBF, de cinco em cinco unidades, e calculando o índice de correlação entre os valores estimados pela rede RBF (Vazão de Gás, Óleo e Água) e os valores reais obtidos no separador de teste utilizados como dados para validação. Os resultados são mostrados na Figura 6.5, onde se observa que, com o aumento do número de neurônios na camada oculta da rede RBF, o índice de correlação entre os valores reais e os estimados, melhora, ou seja, recebe valores próximos de um. Isto é verdade, até o número de neurônios atingir o valor de 45 unidades, onde há uma piora no índice de correlação. Para valores maiores que 55 unidades, por exemplo, não há mudanças significativas. Assim, as quantidades de centros que apresentaram os melhores índices de correlação foram 35 e 40. O que pode ser dito que a rede RBF precisou de 40 pontos que melhor representam os pontos correspondentes aos dados de treinamento (103 pontos). A rede RBF que gerou os resultados mostrados na Figura 6.3 e 6.4 utilizou 40 neurônios na camada oculta.

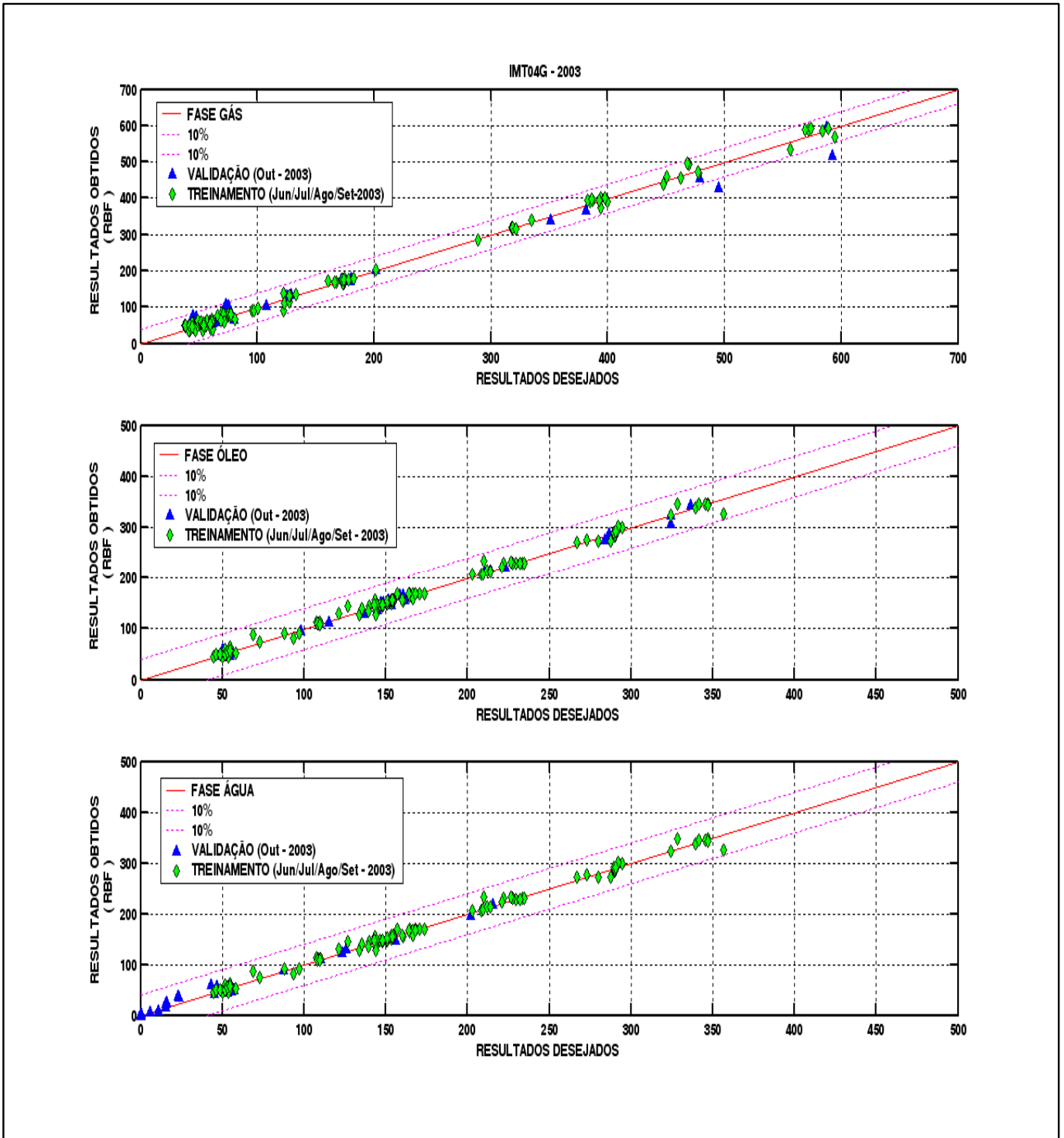


Figura 6.3 – Sobreposição dos resultados da rede RBF para o conjunto de treinamento e validação para cada uma das fases (Gás, Óleo e Água).

Na figura 6.4, onde são mostrados os resultados obtidos para a rede MLP e RBF é possível verificar a semelhança entre as respostas. Observa-se que, para raras as

exceções, a resposta das duas redes para o mesmo conjunto de validação estão sobrepostas.

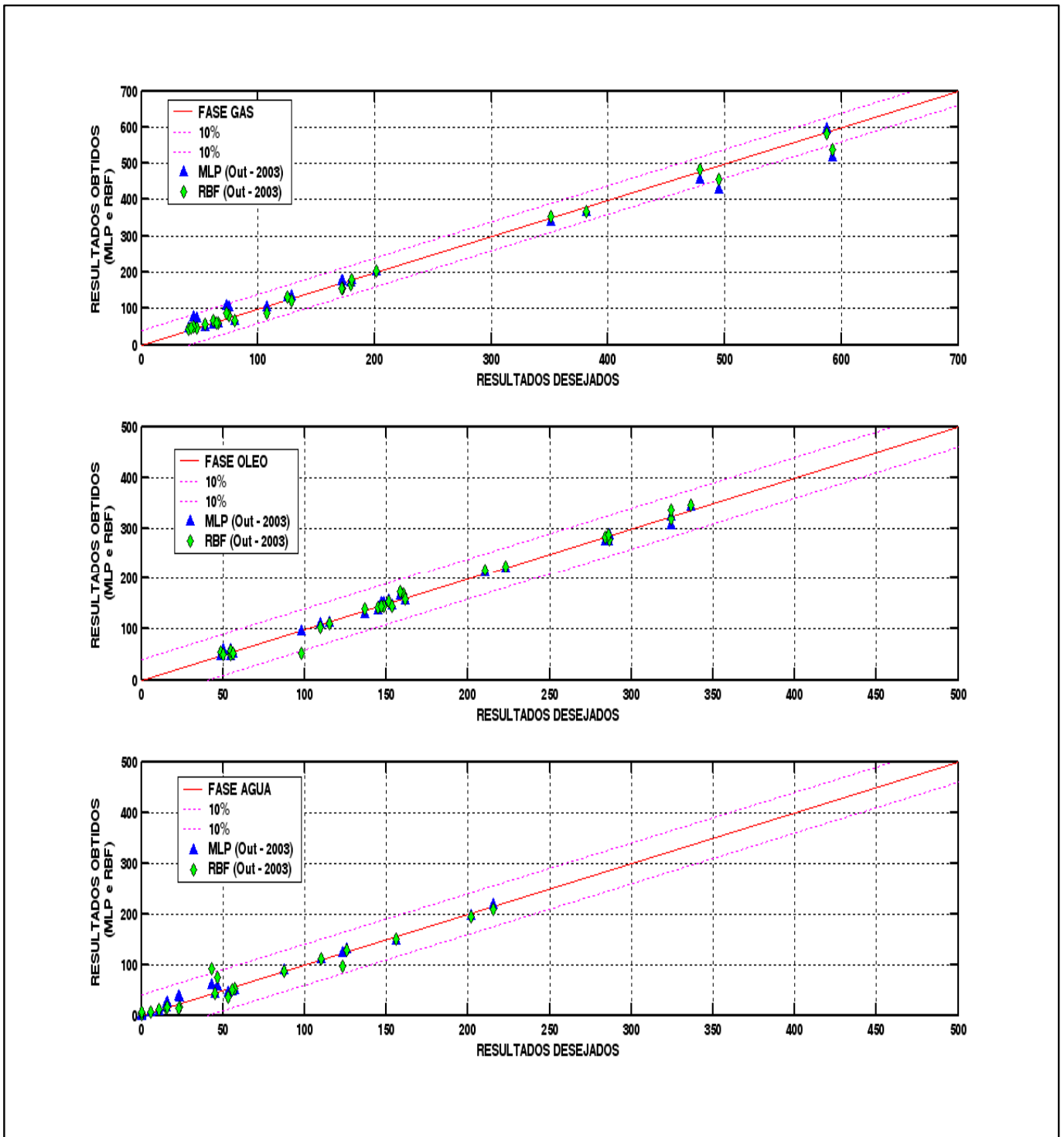


Figura 6.4 – Sobreposição dos resultados da rede RBF e da rede MLP para o conjunto de validação para cada uma das fases (Gás, Óleo e Água).

Em todas as figuras que mostram a comparação entre os valores dos resultados estimados pela rede RBF e os valores reais, o eixo das abscissas representa os resultados da RBF e o eixo das ordenadas os valores medidos (resultantes do separador em questão), ambos, respectivamente, em  $Mm^3/d$ ,  $m^3/d$  e  $m^3/d$ , para as vazões de Gás, Óleo e Água.

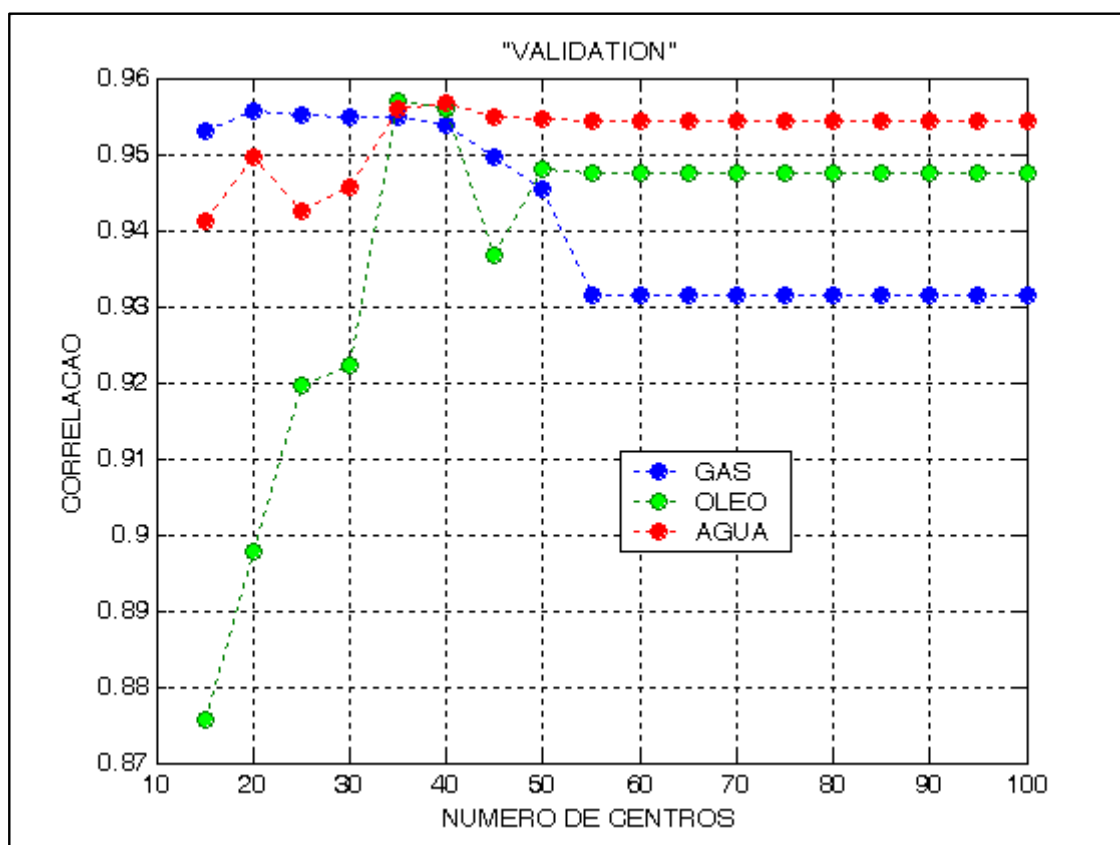


Figura 6.5 Índice de correlação ( $R$ ) calculado para os dados estimados pela rede RBF para o conjunto de validação.

## 6.2 – Separador B: fevereiro a abril (Treinamento) e maio (Validação) de 2005.

Outro ensaio que foi realizado utiliza os dados extraídos dos relatórios dos testes de produção realizados no ano de 2005. Por uma questão de metodologia foram utilizados resultados de testes de produção de pelo menos três meses antes do mês



usado para validação. Os testes realizados no separador B, entre os meses de fevereiro a abril de 2005, foram utilizados para formar o conjunto de treinamento. Enquanto que os testes realizados no mês de maio de 2005 formaram o conjunto de validação. No total, tem-se 61 pontos de dados para treinamento e 21 para validação. Os resultados são mostrados nas Figuras 6.6 a 6.8, para as fases Gás, Óleo e Água, respectivamente.

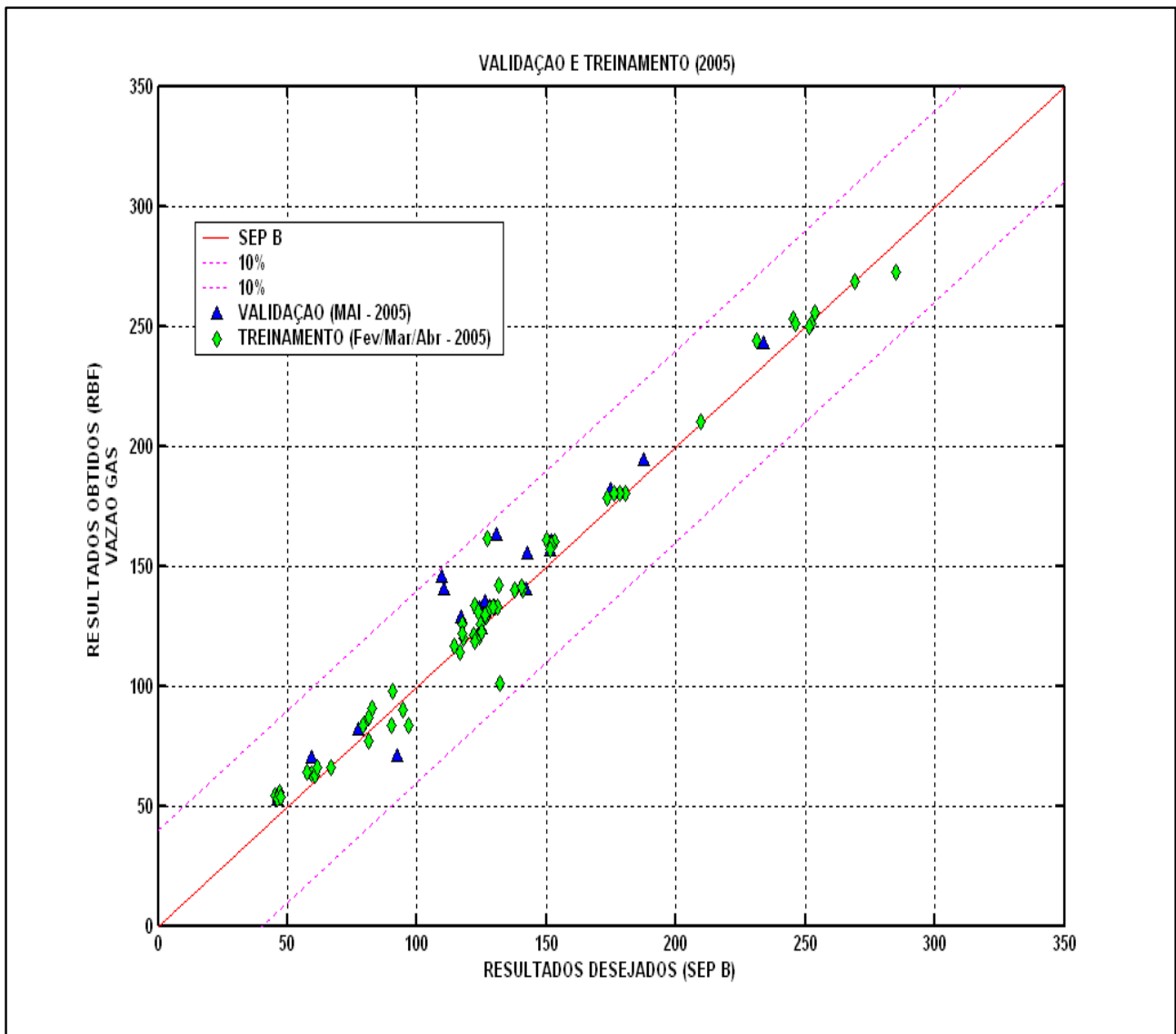


Figura 6.6 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Gás.

Para estes ensaios, o número de funções de base radial, ou seja, o número de neurônios ocultos na rede foi de 25 unidades para um total de 61 padrões de treinamento.

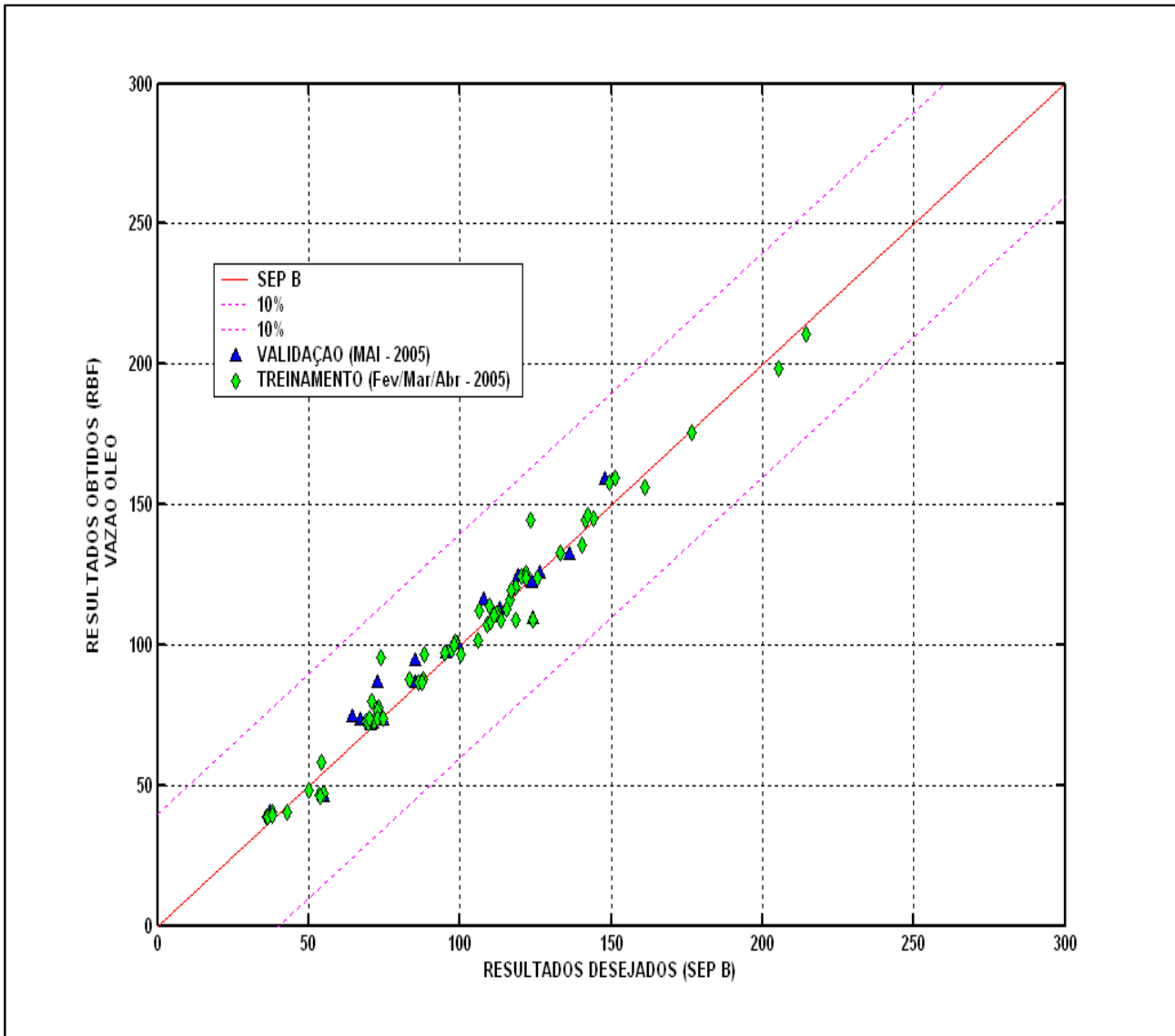


Figura 6.7 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Óleo.

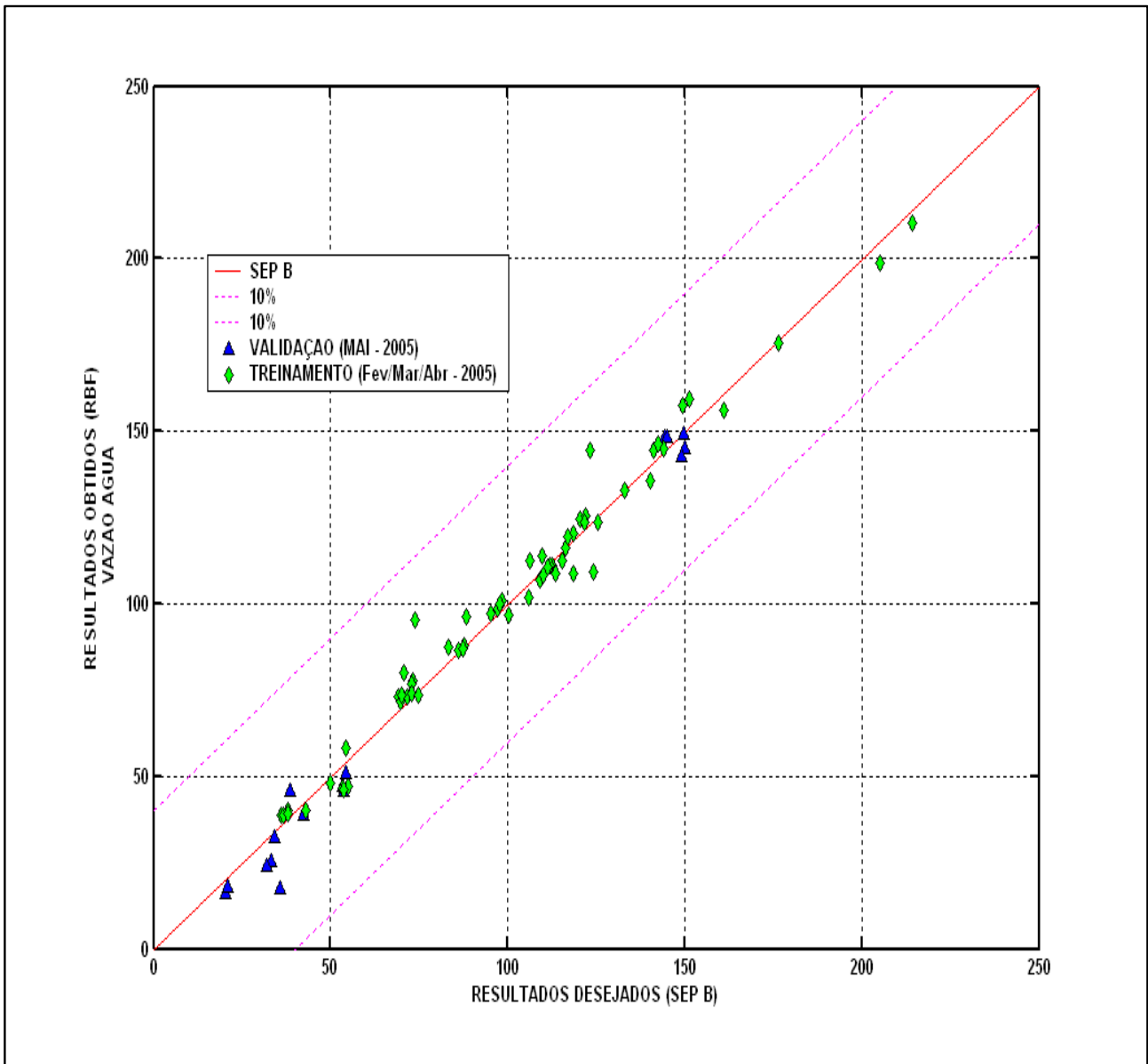


Figura 6.8 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Água.

### 6.3 – Separador G: fevereiro a maio (Treinamento) e junho (Validação) de 2005.

Um terceiro conjunto de testes foi feito. A diferença está no conjunto de dados para formar os dados de treinamento e validação. O separador de teste escolhido foi o Separador G. Todos os testes válidos nos meses de fevereiro a maio de 2005 compoaram o conjunto de treinamento, enquanto que os testes de junho de 2005 formaram os dados para a validação. Os resultados são mostrados nas figuras 6.9 a 6.11.

Para dois poços, a rede RBF não conseguiu prever os resultados para as três fases, o LUC – 35H e o LUC-38H. O conjunto utilizado para treinamento possuía quatro testes de cada um desses dois poços, mesmo assim a rede não conseguiu acertar a predição. Para o poço LUC-35H foi verificado que durante o teste de produção que gerou o padrão validação ocorreu a substituição do *choke* (regulador de fluxo). Assim este poço passou operar em um ponto de operação diferente dos utilizados na fase de treinamento. Isso explica o erro da rede RBF.

Para o poço LUC-38H não foi verificado nenhuma observação nos testes de produção utilizados para treinamento e nem nos utilizados para validação. Assim é possível que tenha ocorrido falha em algum dos sensores da instrumentação da cabeça do poço.

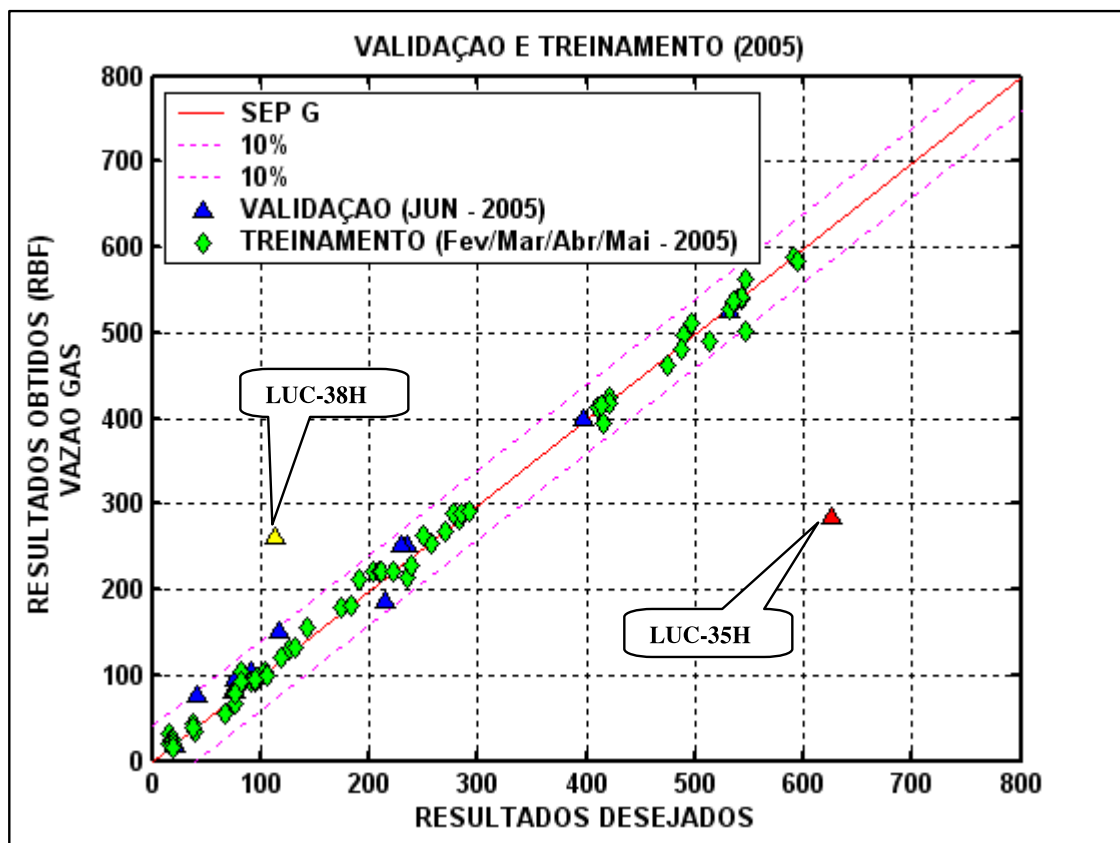


Figura 6.9 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Gás.

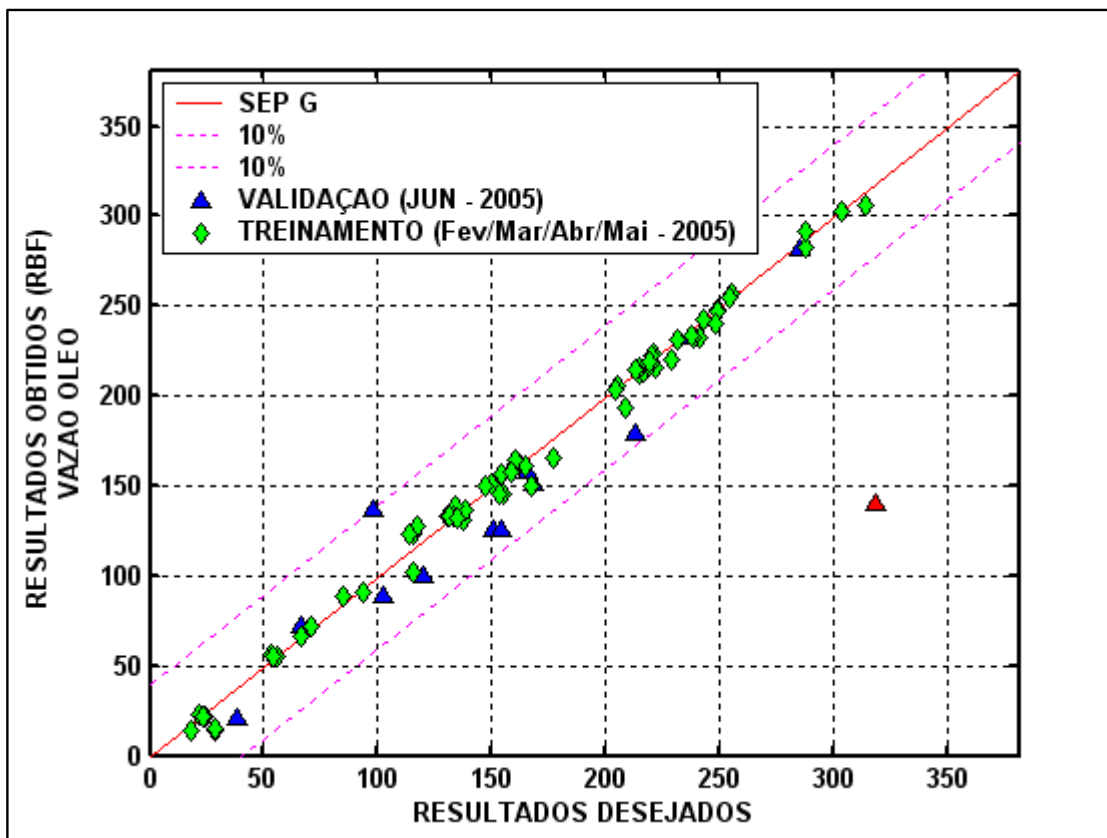


Figura 6.10 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Óleo.

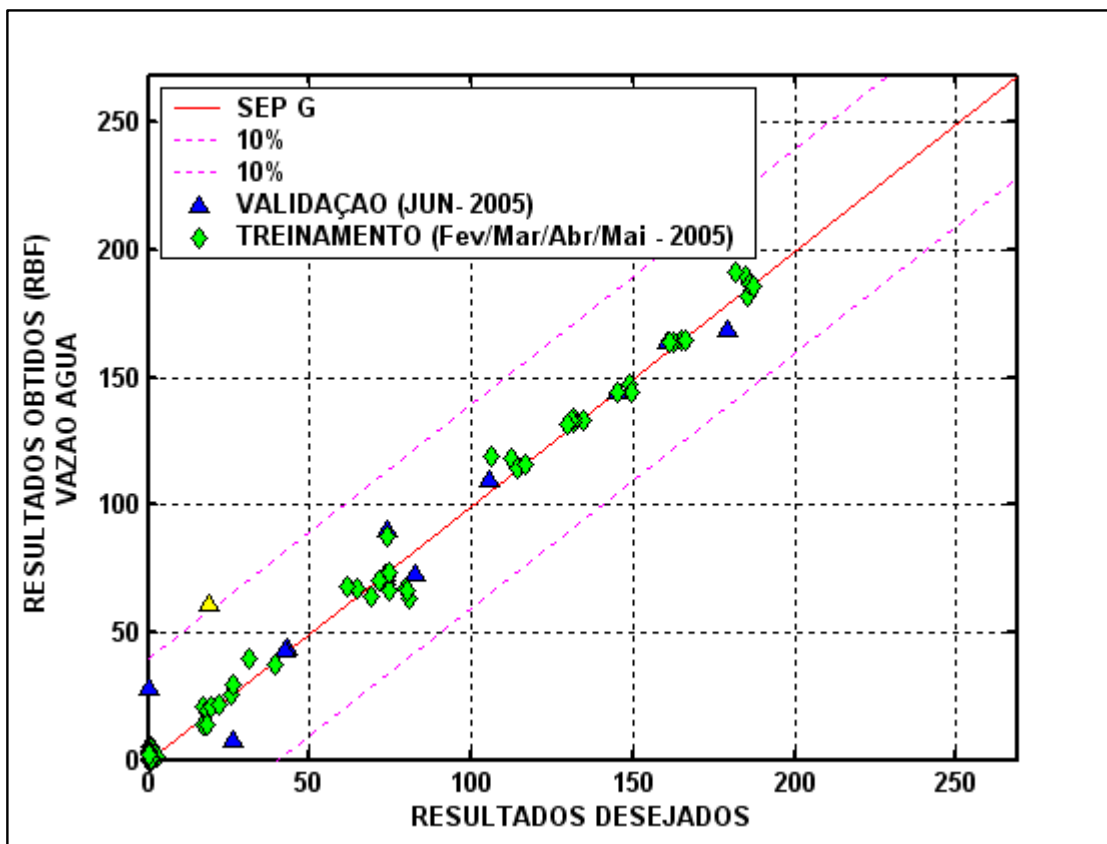


Figura 6.11 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador G – Fase Água.

#### 6.4 - Separador B: junho a setembro (Treinamento) e Outubro (Validação) de 2005.

Os resultados mostrados nas Figuras 6.12 a 6.14 foram obtidos utilizando os testes realizados no separador B entre os meses de junho a setembro, conjunto de treinamento, e outubro, conjunto de validação, de 2005.

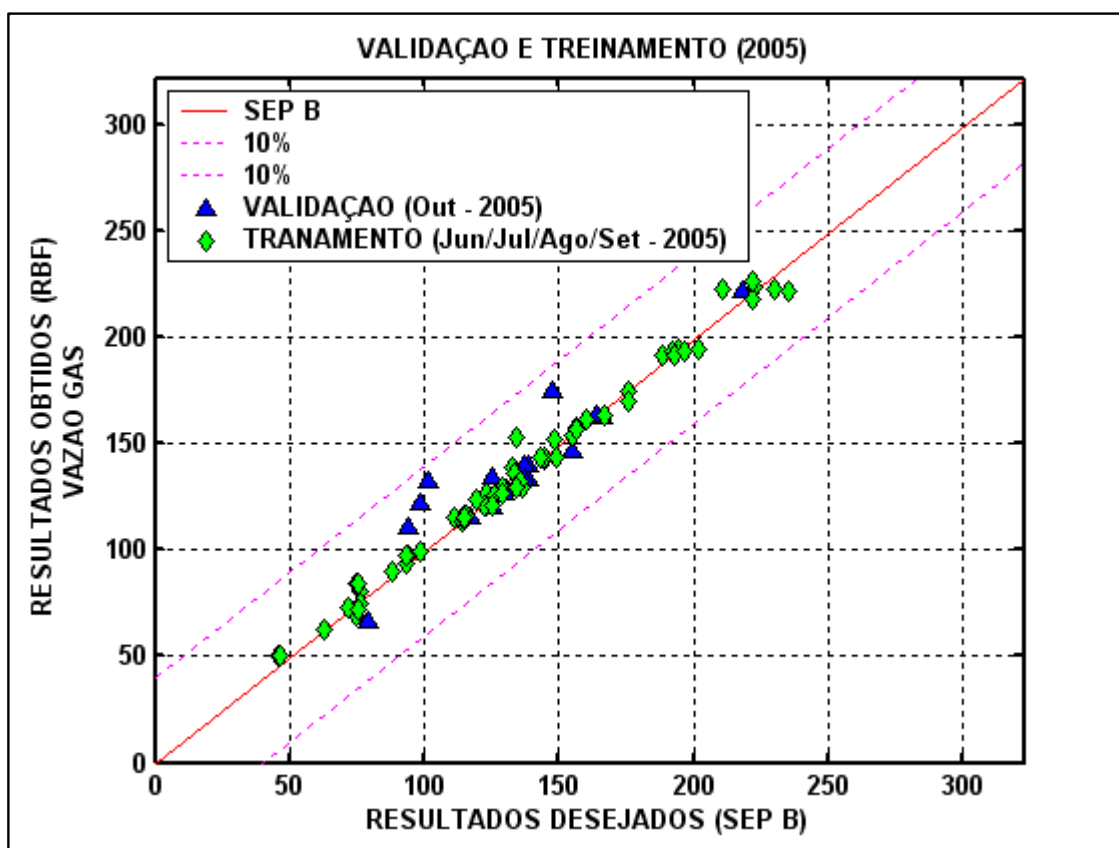


Figura 6.12 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Gás.

Para este ensaio não houve nenhum padrão que tenha se posicionado fora da faixa de tolerância. Assim pode-se dizer que os testes que formaram a base de treinamento foram suficientes para que a rede RBF pudesse prever, com uma faixa tolerável de erro, as vazões para o mês subsequente.

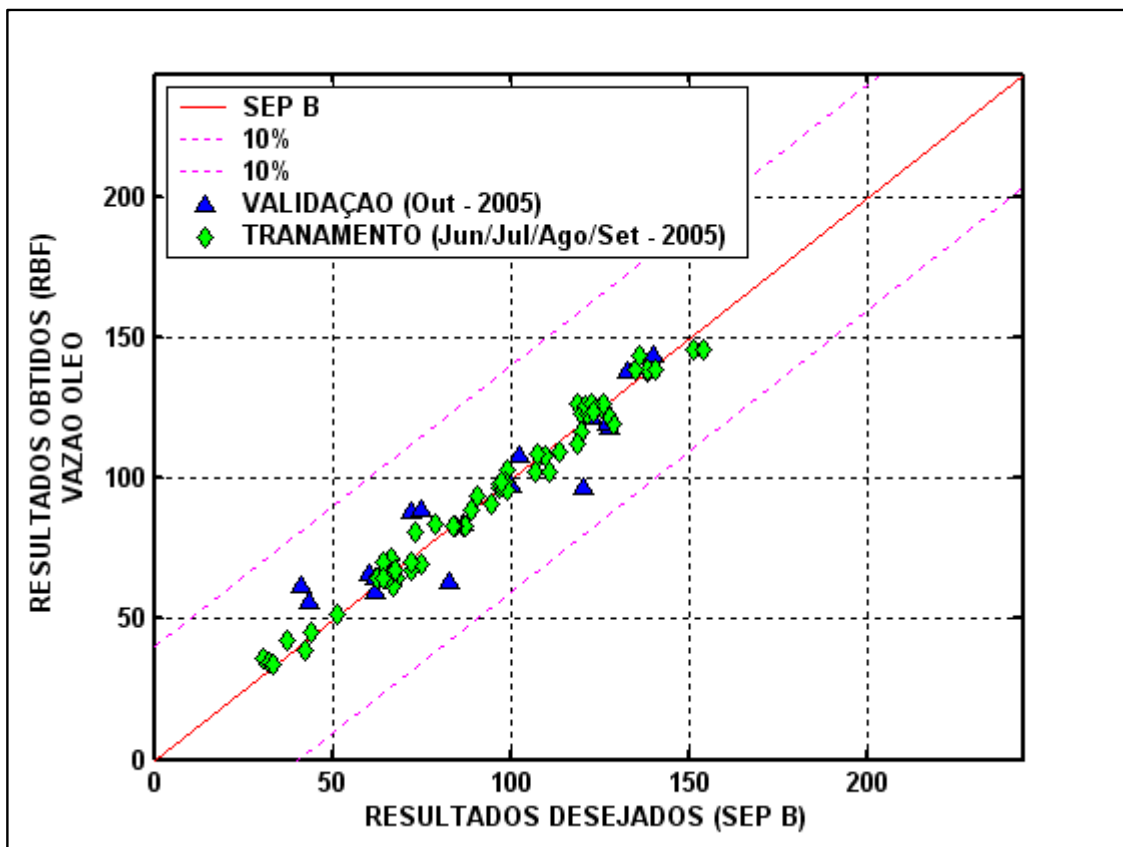


Figura 6.13 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Óleo.

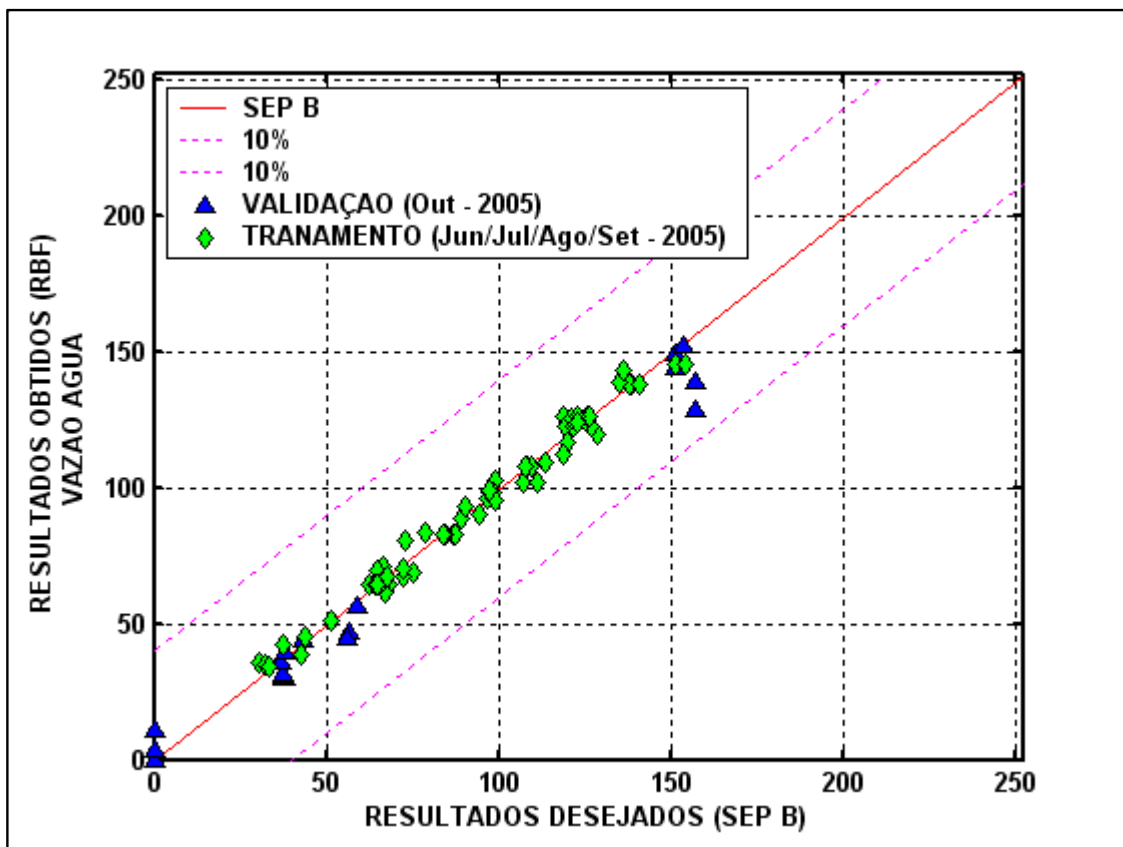


Figura 6.14 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B – Fase Água.

## **6.5 – Separador B e G: junho a setembro (Treinamento) e Outubro (Validação) de 2005.**

O último teste realizado utilizou para formar o conjunto de treinamento, os testes de produção realizados tanto no separador B quanto no separador G, entre os meses de junho a setembro de 2005. Para validação foram utilizados os testes realizados durante o mês de outubro. As Figuras 6.15 a 6.17 mostram os resultados obtidos.

Neste último ensaio, três poços apresentaram problemas, o LUC-37H, o LUC-41 e o LUC-42H. Para o poço LUC-37H, foi constatado que apenas um teste referente a este poço fazia parte do conjunto de treinamento realizado no mês de junho/2005, e este apresentando um padrão diferente de resultado do teste utilizado para validação (outubro/2005). Assim, era de se esperar que o SLP não aproximasse de maneira correta os resultados deste teste.

Nos resumos dos relatórios de produção para o poço LUC-41 não foi constatada nenhuma observação de adversidade durante a realização dos testes; e os padrões de saída tanto para treinamento quanto para validação não apresentaram valores diferenciados. Logo, supõe-se que houve falha em algum sensor na instrumentação utilizada.

Para o poço LUC-42H, uma mensagem de observação foi constatada no resumo do teste de produção utilizado para validação. Durante a realização deste teste a abertura do *choke* (regulador de fluxo) foi alterada. Assim, entende-se que este poço passou a operar num ponto de operação diferente dos padrões apresentados a rede durante a etapa de treinamento.

Na Figura 6.18, é mostrado o resultado do ensaio para se determinar o número de centros, e conseqüentemente, a quantidade de funções de base radial utilizada na camada oculta da rede RBF. Novamente, assim como na Figura 6.5, observa-se que à medida que a quantidade de centros na camada oculta vai aumentando o índice de correlação entre os valores estimados pelo SLP e os valores reais (desejados), aumenta. Isso é verdade até um momento em que, embora ainda haja aumento na quantidade de centros, o índice de correlação não apresenta melhoras significativas.



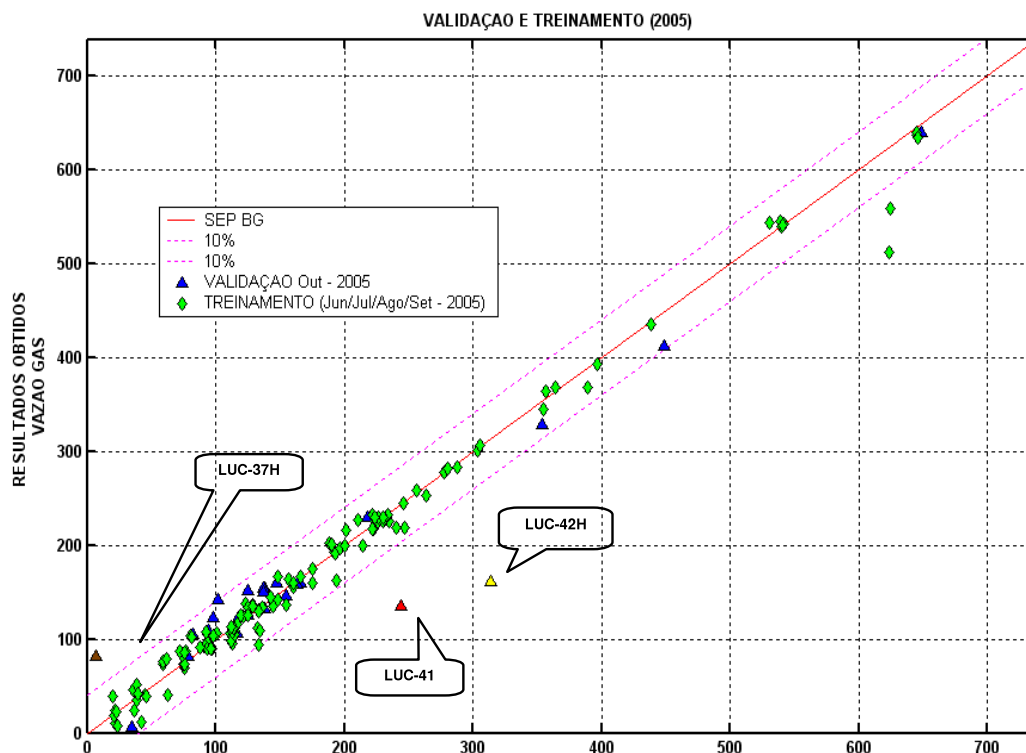


Figura 6.15 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Gás

Na Figura 6.19 é mostrado o comportamento da função custo ao longo das iterações, ver equação (5.6), utilizado pelo algoritmo FCM durante a etapa inicial de treinamento. Nesta etapa a posição dos centros das funções gaussianas é determinada. No entanto, vale ressaltar que esta é a etapa que consome maior tempo de processamento.

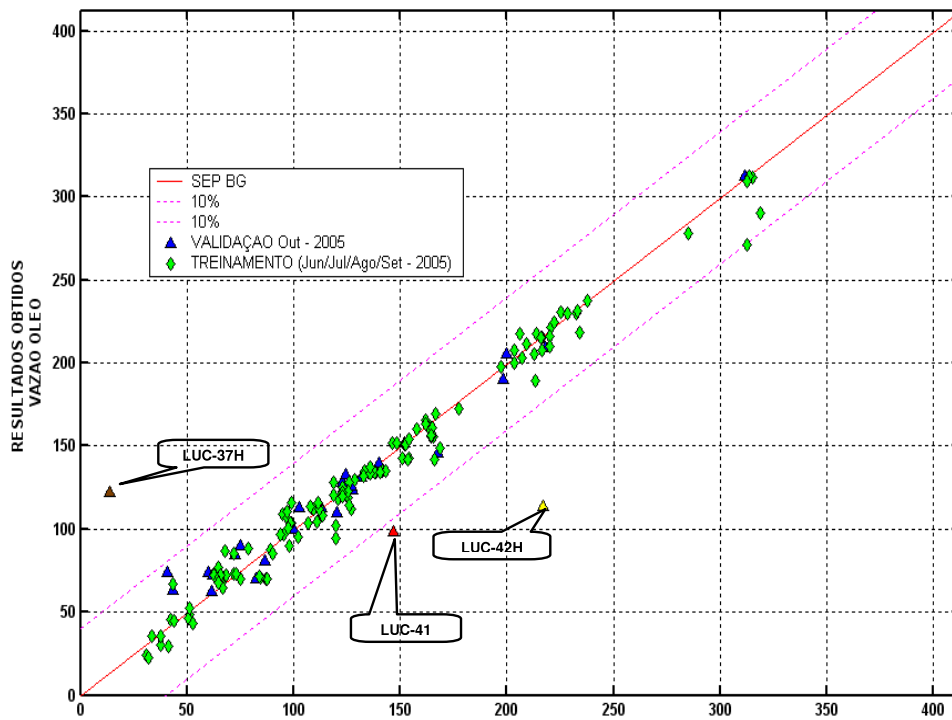


Figura 6.16 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Óleo

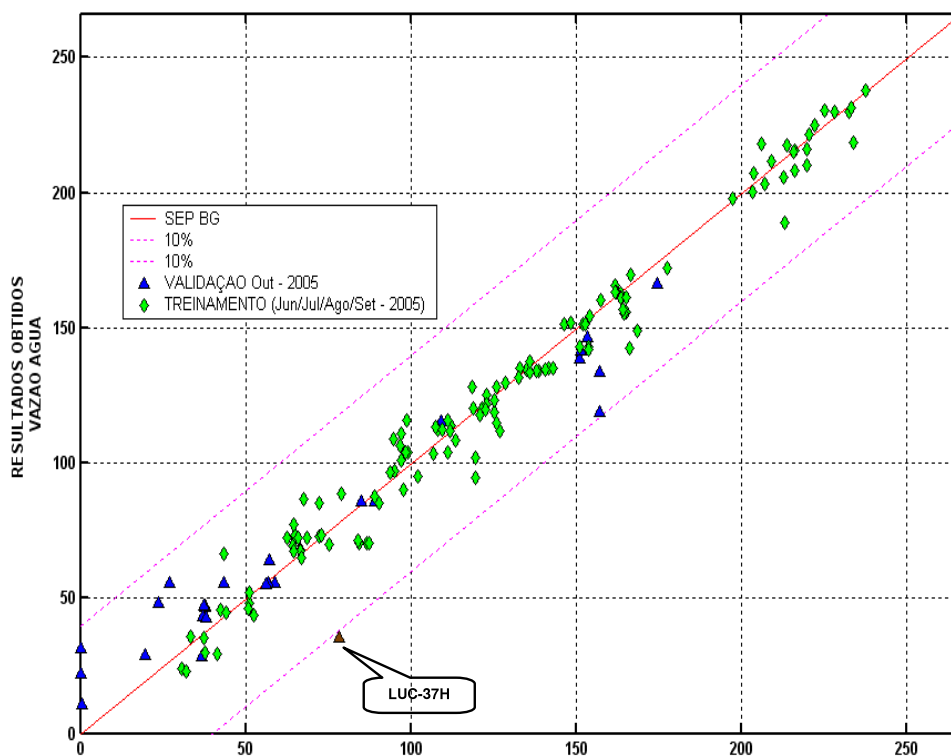


Figura 6.17 Resultados da rede RBF para os poços testados no separador B e G – Fase Água.

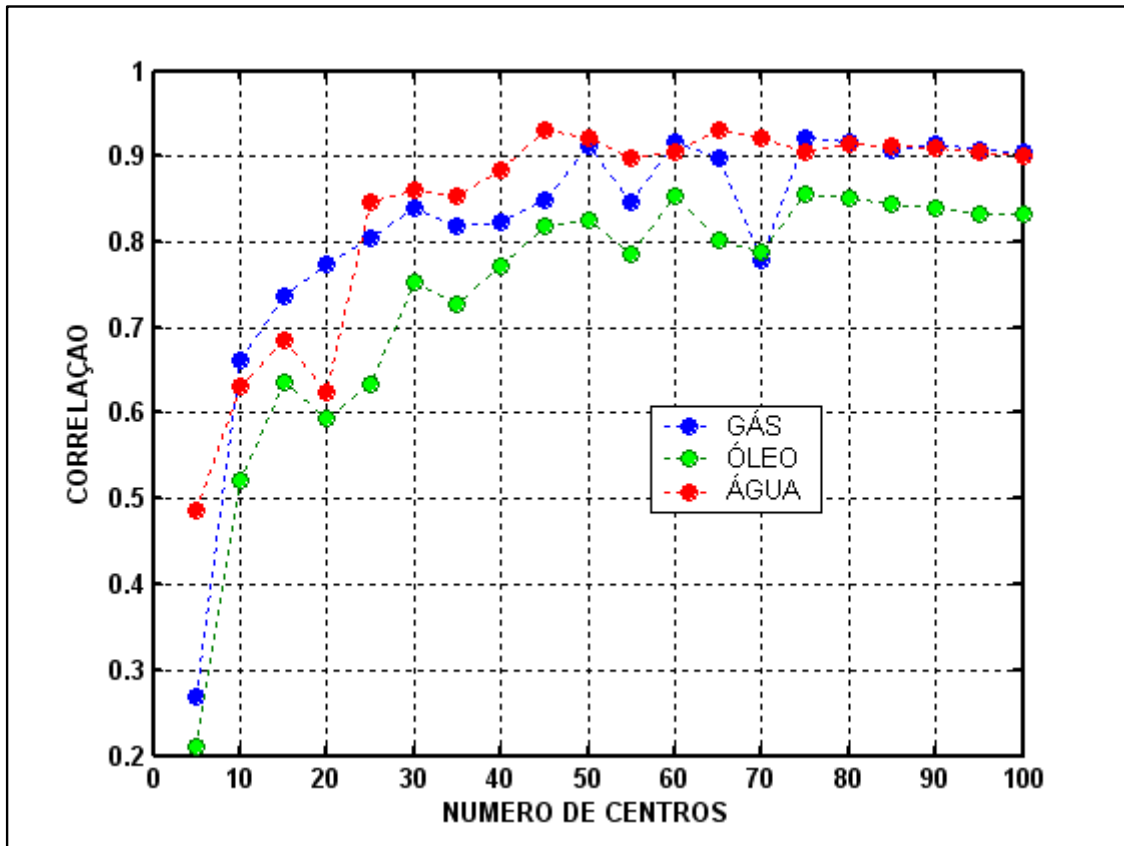


Figura 6.18 Índice de correlação ( $R$ ) calculado para os dados estimados pela rede RBF para o conjunto de validação.

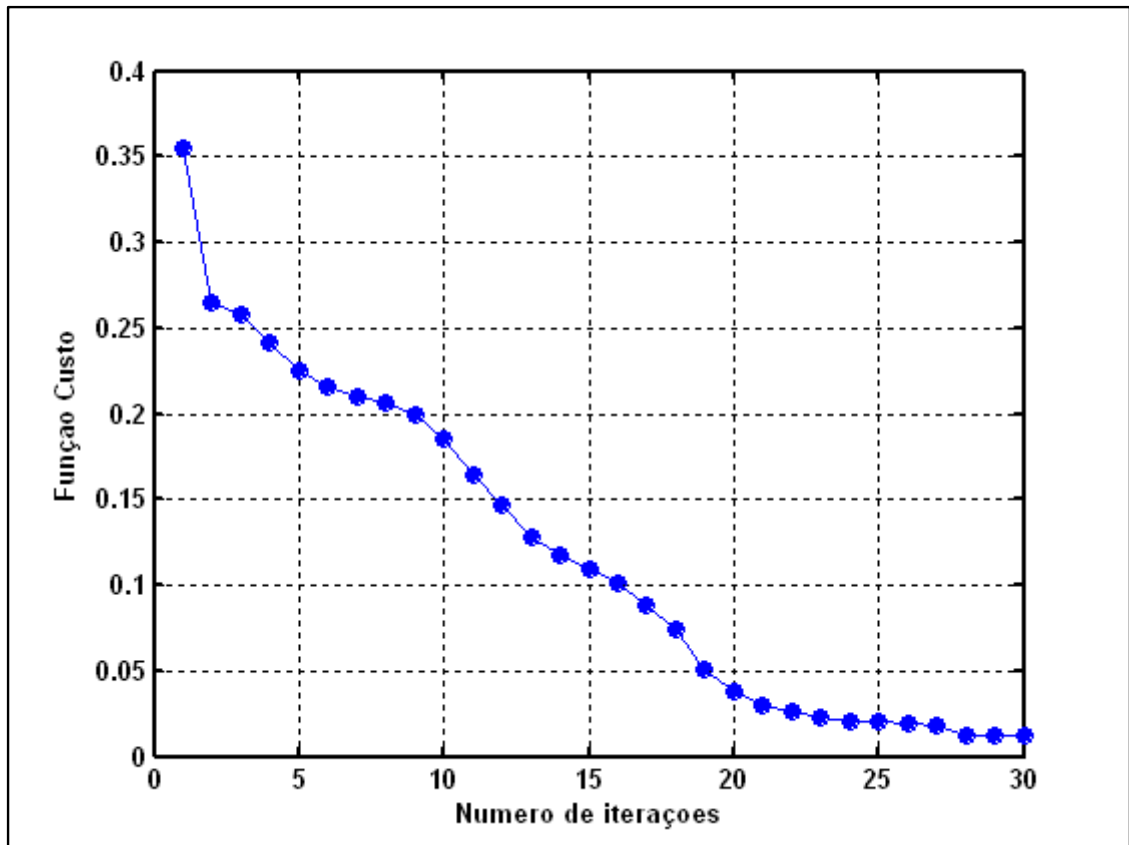


Figura 6.19 Função Custo utilizada na etapa de treinamento pelo algoritmo FCM.

## Capítulo 7 – Considerações Finais

Considerando o que já foi exposto, este trabalho teve como objetivo principal aprimorar o Separador Lógico Programável (SLP), proposto em Silva (2006), que pode ser integrado ao sistema de supervisão e controle de qualquer método de medição (convencional ou multifásico), podendo ser utilizado para o acompanhamento contínuo tanto da produção de petróleo e gás natural de poços pertencentes aos campos de produção de Leste de Urucu, operacionalizado pela Petrobrás, no município de COARI, estado do Amazonas, quanto da produção de outros campos petrolíferos, desde que os respectivos dados sejam utilizados para treinamento da rede RBF.

Esta dissertação está baseada na utilização de inteligência computacional através do emprego de Redes Neurais de Base Radial (RBF) que pode ser inserida nos Controladores Lógicos Programáveis (CLP) dos poços ou em Sistemas Supervisórios que controlam a aquisição de dados (SCADA). Estas técnicas permitiram que o SLP conseguisse reconhecer padrões das variáveis de cabeça de poço e relacioná-los com as vazões volumétricas de óleo, gás e água dos poços, generalizando o processo automaticamente. Este trabalho, também, pode ser utilizado para a validação de testes dos poços, na predição das vazões dos fluidos para separadores de produção e de teste, como sistema redundante de acompanhamento de vazões multifásicas e como possível sistema de identificação de falhas de sensores ou equipamentos de medições.

A principal diferença entre o SLP desenvolvido em Silva (2006) e o apresentado nesta dissertação está relacionada à técnica de inteligência artificial utilizada. Nesta dissertação, utilizou-se outra classe de redes neurais artificiais, conhecida como redes neurais de função de base radial. Esta classe de rede neural apresenta algumas vantagens em relação à rede MLP, desenvolvida naquela referência.

Uma das vantagens está relacionada com o tempo necessário para realizar a etapa de treinamento. As redes RBF requerem tempo de treinamento algumas ordens de grandeza menor que as redes MLP. Isso se explica, pois, durante o treinamento, apenas uma pequena fração de unidades escondidas responde a um dado padrão de entrada.

Outro fator que contribui para a velocidade de treinamento das redes RBF é o esquema de treinamento separado da camada oculta e da camada de saída, descrita no capítulo 5.

Não é o intuito desta dissertação listar as vantagens e desvantagens do uso de redes RBF e redes MLP. Mas, apenas, ressaltar algumas características e situações que tornam o uso de uma ou de outra mais adequada. Em Moody e Darken (1989), por exemplo, é afirmado que quando se tem dados abundantes e baratos é melhor o uso de redes RBF, caso contrário, redes MLP são mais indicadas.

Em geral o uso de redes RBF para o desenvolvimento do SLP apresentado nesta dissertação mostrou resultados plenamente satisfatórios. Como dito anteriormente, em Redes RBF só uma pequena parte das unidades ocultas respondem a um dado padrão de entrada, pois são unidades localmente sintonizáveis. Isso explica o erro que a rede RBF comete quando ocorre alguma alteração no ponto de operação da produção de um poço.

Finalizando, como uma das principais contribuições do presente trabalho, ressalta-se a confirmação da importante metodologia proposta em Silva (2006). Além da possibilidade de se utilizar mais uma técnica de inteligência computacional para o desenvolvimento do Separador Lógico Programável.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

Estudo de viabilidade de se gravar o código que implementa a rede RBF em linguagem de programação *ladder*;

Estudo para o desenvolvimento do SLP utilizando outras técnicas de inteligência artificial, como redes SVM (do inglês *Support Vector Machine*);

Utilizar como entrada do SLP variáveis de fundo de poço, em conjunto com as variáveis de cabeça, para a estimação das vazões de óleo, gás e água;

---

## Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP) – **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e Gás Natural 2003**, Ministério da Minas e Energia, (2003).

BARRETO, A. da M. S. **Algoritmo Genético dos Mínimos Quadrados Ortogonal para Treinamento de Redes RBF**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da COPPE/ UFRJ.(2003)

FRANTZEN, K.H.; BRANDT, M.; OLSVIK, K. – **Multiphase Meters – Operation Experience in the Asia-Pacific** in SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta (Indonesia), pp. 15-17, Abril (2003).

HAYKIN, S. – **Neural Networks – A Comprehensive Foundation**, Macmillan College Company, New York (Estador Unidos), (1994).

HAYKIN, Simon. - **Redes Neurais: Princípios e prática**, Bookman Companhia Editora, Porto Alegre (2002).

KRAMER, M. A. e LEONARD, J. A. **Radial Basis Function Networks for Classifying Process Faults**. *IEEE*. (1991)

LEGGETT, R.B.; BORLING, D.C.; POWERS, B.S.; SHEHATA, K.; HALVORSEN, M.; ELENAIN, A.A. – **Multiphase Flowmeter Successfully Measures Three-Phase Flow at Extremely High Gas-Volume Fractions – Gulf of Suez, Egypt** in European Petroleum Conference, Milan (Itália), pp. 22-24, Outubro (1998).



---

MICCHELLI, C. A. **Interpolation of scattered data: Distance matrices and conditionally positive definite function.** *Constructive Approximation*, Vol. 2, pp 11-22. (1986).

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada.** Editora UFMG. (2005).

MOODY, J., e DARKEN, C. J. **Fast learning in networks of locally-tuned processing units.** *Neural Computation*, Vol.1, pp.281-294. (1989).

NAGAI, E. Y. e ARRUDA, L. V. R. de. **Identificação de modelos lingüísticos via agrupamento Fuzzy.** *Congresso Brasileiro de Automática.* (2002).

ORR, M. J. L. **Optimising the Widths of Radial basis Functions.** *In Vth Brazilian Symposium on Neural Networks.* (1998).

SILVA, P. A. S. da. **Programa de Automação Inteligente Aplicado ao Gerenciamento e Fiscalização da Produção de Poços de Petróleo e Gás Natural.** Tese de Doutorado PPGEE/UFPA. (2006).

SCOTT, B.N & KVAMSDAL, D. – **New Concept in Well Testing: The Compact Cyclone Multiphase System** *in* SPE Permian Basin Oil and Gas Reovery Conference, Texas (Estados Unidos), pp. 21-23, Março 2000.

WILLIAMS, J. - **Status of Multiphase Flow Measurement Research** *in* SPE 69th Annual Techmcal Conference and Exhibition, New Orleans (Estador Unidos), pp.25-28, Setembro 1994.

WU, H.; ZHOU, F.; WU, Y. - **Intelligent identication system of flow regime of oil-gas-water multiphase flow** *in* International Journal of Multiphase Flow, v. 27, n.1, pp. 459-475, 2001.

---

YEUNG, H. & IBRAHIM, A. – **Multiphase Flows Sensor Response Database** *in* Flow Measurement and Instrumentation 14, Cranfield University (Reino Unido), pp.219-223, 2003.