



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

Otimização do Transporte em Oleodutos Utilizando Algoritmos Genéticos e Programação Linear

por: Adriano Cavalcanti da Silva
orientadores: Prof. Dr. Jurandir F. R. Fernandes
Prof. Dr. Takaaki Ohishi

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia Elétrica da Universidade
Estadual de Campinas, para
preenchimento dos pré-requisitos
parciais para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Adriano Cavalcanti
da Silva e aprovada pela Comissão
Julgada em 26/04/99
J. F. R. F.
Orientador

Abril de 1999



7539/65

UNIDADE	BC
N.º de controle	
N.º de identificação	
N.º de classificação	38583
PREÇO	229/99
C.º de classificação	
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	31/08/99
N.º GPU	

CM-00125650-3

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38o

Silva, Adriano Cavalcanti da

Otimização do transporte em oleodutos utilizando algoritmos genéticos e programação linear. / Adriano Cavalcanti da Silva.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: Jurandir F. R. Fernandes, Takaaki Ohishi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Algoritmos genéticos. 2. Programação linear. 3. Petróleo - Transporte. 4. Oleodutos. I. Fernandes, Jurandir F. R.. II. Ohishi, Takaaki. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

TESE DE MESTRADO

Título : Otimização do Transporte em Oleodutos Utilizando Algoritmos
Genéticos e Programação Linear
Autor : Adriano Cavalcanti da Silva
Orientadores : Prof. Dr. Jurandir F. R. Fernandes
Prof. Dr. Takaaki Ohishi

APROVADO POR:



Prof. Dr. Jurandir Fernando Ribeiro Fernandes, Presidente

Prof. Dr. Fernando de Almeida França

Prof. Dr. Paulo Morelato França

Campinas, 26 de abril de 1999

Esta pesquisa teve o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

Agradecimentos

Meu especial agradecimento ao Prof. Jurandir pela força e orientação na elaboração desta pesquisa, e incentivo para que eu siga alcançando novos horizontes.

Ao Prof. Takaaki pela amizade e imenso companheirismo dedicado durante a elaboração deste trabalho, pela determinação e estímulo, me levando a atingir todos os resultados desejáveis do modelo desenvolvido. Meu eterno agradecimento Taka.

Ao Prof. Fernando França por sua paciência e colaboração de grande importância neste trabalho.

A Alexandre de Sousa Mendes, pela sua especial colaboração sobre o tópico algoritmos genéticos, muito obrigado.

Aos Professores Hermano Tavares, Leo Pini, Christiano Lyra, Sebastião Amorin, Clóvis Perin, Paulo França, Secundino Soares, Vinícius Armentano, Beatriz Daltrini, pela acolhida e amizade.

À Companhia Petrolera Perez Companc S.A., pelo interesse ao disponibilizar toda uma equipe técnica em minha visita na unidade de Entre Lomas, e a todas as pessoas que lá me acompanharam de forma tão amável. Em especial ao senhor Antonio Koharic, gerente da área Entre Lomas, pela confiança que demonstrou na viabilidade da proposta deste trabalho. Aos senhores Mario Brarda e Carlos Aramburu pelo companheirismo demonstrado e interesse ao enfatizarem os principais aspectos para um modelo de automação voltado ao problema de transporte com fluxo constante. Aos senhores Mattias Santiago e Luis Badia pela paciência ao responderem a todas as perguntas que fiz durante e após a minha estada em Neuquén.

À Professora Eng. Eliana A. R. Delgado, da Universidade Nacional del Comahue, pelo apoio ao intermediar junto a empresa Petrolera Perez Companc a visita que resultou neste trabalho. Por ter me recebido em sua residência por um mês, de forma muito acolhedora.

À CNPq que possibilitou o suporte financeiro necessário ao desenvolvimento deste trabalho, resultado de minha dedicação exclusiva ao mestrado.

Ao pessoal da Embrapa-NMA, entre os quais Evaristo E. Miranda, J. Roberto Miranda, Ivo Pierozzi, João A. C. Mangabeira, Mateus Batistella, Marlise Zonta, Rosangela N. Pereira, pelo incentivo e apoio, muito obrigado.

Aos grandes amigos que encontrei no DENSIS e na Elétrica de um modo geral que participaram desta caminhada, os quais estarão para sempre em minhas memórias, entre eles: Leandro Sauer, J. E. Claudio Arroyo, Alexandre S. Mendes, José Raimundo G. P., Fernando Villas Boas, Alda M. P. Oliveira, Eduardo Quaglia, Jeanne Dobgenski, Claudio F. M. Toledo. Ao Walcir Fontanini, administrador do laboratório, com quem pude contar mesmo em finais de semana.

Aos meus pais, Dionice e Nitercílio, que tornaram realidade este projeto e ao meu irmão Adenilson, pelo companheirismo.

1. Resumo

Este trabalho aborda o problema do transporte de petróleo, extraído de poços e estocado em tanques, de forma a ser entregue em uma planta de pré-processamento. A finalidade desta planta é separar a água e o sal mesclados ao petróleo, para depois enviá-lo para as refinarias que produzem os diversos derivados do petróleo.

O objetivo do presente trabalho é o de garantir uma taxa de fluxo constante, para o ponto de entrega na planta de pré-processamento, de maneira a evitar flutuações em sua capacidade, devido as implicações negativas no processo de injeção de produtos, estabilidade física e química nos processos realizados na planta.

A metodologia proposta consiste de um procedimento híbrido, no qual a resolução do problema é decomposto em T subproblemas, um para cada intervalo de tempo, sendo que estes subproblemas são resolvidos seqüencialmente a partir do primeiro intervalo de tempo até o último intervalo. A primeira etapa trata somente do problema com variáveis inteiras, e a segunda etapa trata somente das variáveis contínuas.

A análise da solução é proposta pela utilização de algoritmos genéticos e programação linear, baseada na modelagem matemática que permite atingir ótimos resultados com um pequeno esforço computacional.

A busca no espaço de soluções combinatórias baseia-se no controle do funcionamento das bombas, com o objetivo de controlar a entrega do petróleo a planta de pré-processamento. A seleção da contribuição de cada bomba é feita com base no regime de enchimento de seu tanque, que por sua vez depende da contribuição dos poços.

A aplicação deste método é de grande utilidade para atingir as condições de um estado contínuo em redes de transporte, redes de distribuição, problemas de controle de petróleo e gás, e muitos outros tópicos correlacionados, especialmente para refinarias de processos químicos e operações de sequenciamento em linhas de produção. Permite também otimizar o uso de instalações existentes evitando gastos extras e possibilitando a automação das operações de sequenciamento, diminuindo falhas humanas. A implementação também busca uma minimização das pressões exercidas sobre a rede de dutos, aumentando assim a vida útil das linhas, bombas e equipamentos auxiliares.

1. Abstract

This work treats the problem of petroleum transport, extracted from wells and stocked in containers, in order to achieve preprocessing plant. The purpose of this plant is take out the water and salt mixed within the oil, and after send the petroleum treated to refineries which produce derivative products.

The goal of present work is to warranty a constant flow rate, at the inlet of the oil treatment plant, in order to avoid fluctuations on the capacity, which have implications on dosing of products, stability of physical and chemical processes that take place within the plant.

The methodology proposed consist in a hybrid proceeding, in that the problem resolution is decomposed in T problem steps, one to each interval, and this steps in the problem are resolved sequentially from the first interval through the last interval of time. The first step treats only the problem with integer variables, and the second step of resolution treats only the continue variables.

The solution analysis were proposed by means with Genetic Algorithms and Linear Programming, based on applied mathematical modeling, which allows to reach optimal results at a short computational effort.

The combinatorial effort is focused on the solutions possibility space to control pumps functioning, with the objective to control the oil delivery from those pumps to the central treatment plant. The selection of each pump contribution is made on the basis of its container own filling regime, which in turn, depends on the wells contribution.

Applications of this method are helpful to reach steady state conditions in transport nets, distribution nets, oil and gas control problems, and many other related subjects, especially for plant processes and scheduling operations in production plants. Also permits to optimize the use of existing installations avoiding extra expenditures and allows automating the operations schedule, avoiding human errors. The implementation also seeks for the minimization of pressure in pipes networks, thus increasing the life of lines, pumps and ancillary equipment.

*“A quem deva caminhar cem milhas...
deve-se pensar ao atingir noventa como sendo a metade.”**

(*) Provérbio Zen-budista

Para minha esposa Ester,
pela compreensão e apoio.

Conteúdo

Agradecimentos		ii
Resumo		iv
Abstract		v
Dedicatória		vi
Conteúdo		vii
Introdução Geral		1
Capítulo 1	O Problema de escoamento da Produção de Petróleo	3
1.1	Introdução.....	3
1.2	O estado da arte.....	7
1.3	Sistema de produção da Petrolera Perez Companc – área Entre Lomas.....	9
1.3.1	Descrição das estações de coleta de petróleo e da configuração da rede.....	10
1.4	Mecânica de fluídos.....	14
Capítulo 2	Formulação do Problema	18
2.1	Introdução.....	18
2.2	Formulação do problema.....	18
2.3	Metodologia proposta.....	21
Capítulo 3	Algoritmos Genéticos	23
3.1	Introdução.....	23
3.2	Detalhes de implementação de um AG.....	27

Capítulo 4	Programação Linear	34
4.1	História da programação linear.....	34
4.2	Método Simplex.....	35
Capítulo 5	Metodologia de Resolução	40
5.1	Introdução.....	40
5.2	Aplicação do Algoritmo Genético para a seleção de bombas.....	41
5.3	Despacho das bombas.....	46
Capítulo 6	Análise dos Resultados	49
6.1	Validação do Modelo.....	49
6.2	Sistema completo.....	49
6.3	Avaliação de estabilidade do AG implementado.....	63
6.4	Uma análise multiojetivo.....	65
6.5	Contingência simples.....	69
6.6	Estudo da variação dos parâmetros.....	75
Conclusão Geral		79
Referências Bibliográficas		82
Apêndice A	Implementação da Rotina de Execução Dinâmica do Pacote CPLEX	86

Índice das Figuras

<i>Figura 1.1: Mapa da fronteira (Argentina-Chile).....</i>	9
<i>Figura 1.2: Mapa da província de Neuquén – Patagonia.....</i>	9

<i>Figura 1.3: Produção dos poços.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1.4: Layout do oleoduto.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1.5: Capacidade de estoque por tanque.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.6: Layout da PPP.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.7: Pseudocódigo da rotina de cálculo de pressões.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.1: Algoritmo que integra AG com PL para o transporte de petróleo.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.1: Pseudo-código de um algoritmo genético.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.2: Representação do estado das bombas conectadas ao oleoduto.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.3: Exemplo da ação de um operador de mutação.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.4: Exemplo da ação de um operador de mutação.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.5: Um exemplo genérico de crossover uniforme.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.6: Um exemplo de escolha aleatória pelo método roleta.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.7: Seleção dos pais através da roleta para o próximo cruzamento.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.1: Forma genérica de um problema linear.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 5.1: Pseudocódigo da implementação do AG.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.2: Representação do estado das bombas conectadas ao oleoduto.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.3: Layout da rede de dutos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.4: Produção por ramal.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 6.1: Layout da rede de dutos.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 6.2: Série histórica de tanques representativos.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 6.3: Histograma de volumes.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 6.4: Série histórica de tanques representativos.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 6.5: Histograma de volumes.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 6.6: Série histórica de tanques representativos.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 6.7: Histograma de volumes.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 6.8: Série histórica de tanques representativos.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.9: Histograma de volumes.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 6.10: Boxplot do número de partidas de máquinas.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 6.11: Boxplot do número de partidas de máquinas.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 6.12: Comparação entre os quatro tempos de intervenção: volume dos tanques.....</i>	<i>66</i>

<i>Figura 6.13: Comparação das partidas de bombas entre os quatro tempos de intervenção.....</i>	67
<i>Figura 6.14: Diferentes tempos de intervenção no envio de petróleo e o volume máximo.....</i>	68

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1: Termos utilizados em AG e a suas associações dentro da matemática.....</i>	26
<i>Tabela 6.1.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora).....</i>	51
<i>Tabela 6.1.2: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora).....</i>	51
<i>Tabela 6.1.3: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora).....</i>	52
<i>Tabela 6.1.4: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora).....</i>	52
<i>Tabela 6.2: Pressão máxima na rede (intervenções a cada meia hora).....</i>	53
<i>Tabela 6.3.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora).....</i>	56
<i>Tabela 6.3.2: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora).....</i>	56
<i>Tabela 6.4: Pressão máxima na rede (intervenções a cada uma hora).....</i>	57
<i>Tabela 6.5.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora e meia).....</i>	58
<i>Tabela 6.5.2: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora e meia).....</i>	59
<i>Tabela 6.6: Pressão máxima na rede (intervenções a cada uma hora e meia).....</i>	59
<i>Tabela 6.7: Comportamento do modelo com intervenções a cada duas horas.....</i>	61
<i>Tabela 6.8: Pressão máxima na rede com intervenções a cada duas horas.....</i>	61
<i>Tabela 6.9: Estatística descritiva - intervenção a cada meia hora.....</i>	64
<i>Tabela 6.10: Estatística descritiva.....</i>	65
<i>Tabela 6.11: Estatística descritiva dos volumes.....</i>	66
<i>Tabela 6.12: Estatística descritiva das partidas de bombas.....</i>	68
<i>Tabela 6.13.1: Contingência simples: 4CB.....</i>	70
<i>Tabela 6.13.2: Contingência simples: 4CB.....</i>	70
<i>Tabela 6.13.3: Contingência simples: 4CB.....</i>	70
<i>Tabela 6.13.4: Contingência simples: 4CB.....</i>	70
<i>Tabela 6.14.1: Contingência simples: 6CB.....</i>	71

<i>Tabela 6.14.2: Contingência simples: 6CB.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 6.14.3: Contingência simples: 6CB.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 6.14.4: Contingência simples: 6CB.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabela 6.15.1: Contingência simples: 6PB.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.15.2: Contingência simples: 6PB.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.15.3: Contingência simples: 6PB.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.15.4: Contingência simples: 6PB.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 6.16: Contingência simples: 4CB.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 6.17: Contingência simples: 6CB.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 6.18: Contingência simples: 6PB.....</i>	<i>75</i>

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização de técnicas de otimização são muitas e vem demonstrando os seus benefícios nas mais diversas áreas de aplicação. O estudo conduzido trata da aplicação de algumas técnicas a uma situação real em um campo de produção de petróleo. É apresentado a elaboração de um conjunto de heurísticas através das quais procura-se a melhor forma de operar um conjunto de 16 bombas que realizam o transporte do petróleo para uma planta de pré-processamento. Esta planta de pré-processamento trabalha com processos físicos-químicos; desta forma que é desejável a menor variação na entrega do fluido para o tratamento. O armazenamento da produção de inúmeros poços é estocada em 16 tanques, estando cada poço conectado a um único tanque. Cada tanque apresenta uma distinta velocidade de enchimento e capacidade de estoque, precisando periodicamente ser esvaziado.

A formulação para o problema pretende alcançar o estado contínuo da vazão do petróleo, garantindo a realização desta tarefa sem a alteração de tubulações na rede de dutos ou a troca de bombas.

1. Organização do trabalho

No capítulo 1 é apresentada a idéia geral do funcionamento de um campo de petróleo, desde a saída do poço, o armazenamento nas estações de coleta, e as especificações sobre aspectos ambientais considerados na produção petrolífera.

No Capítulo 2 faz-se a representação matemática para o problema, discutindo-se as ferramentas que estarão sendo utilizadas para otimizar o transporte em dutos. São também enfatizados os aspectos de programação mista, inerentes ao problema.

No Capítulo 3 é detalhada a utilização de algoritmos genéticos, apresentando-se os principais operadores empregados pelos algoritmos genéticos: cruzamento, mutação, roleta. É discutido o critério de seleção utilizando a técnica da roleta, valorizando o aspecto evolutivo para seleção do melhor indivíduo.

No Capítulo 4 será apresentado a história da programação linear e discutido o algoritmo simplex.

No Capítulo 5 estão sendo detalhados a implementação e o algoritmo aplicado na resolução do problema. Será apresentada a representação do problema necessária à resolução do genético.

No Capítulo 6 é feita uma análise dos resultados, sendo apresentado o comportamento de quatro instâncias diferentes para o modelo geral aplicado ao problema de transporte em oleodutos. Dois foram os aspectos avaliados na escolha do tempo para intervenção no sistema de bombeamento: número de partidas e o nível de ocorrência do volume máximo entre os tanques.

Em Conclusão Geral é apresentado uma análise sobre os principais resultados e aplicações da pesquisa, sendo sugerido possíveis abordagens para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 1. O PROBLEMA DE ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

1.1 Introdução

- **O petróleo**

O homem tem conhecimento do petróleo há tempos, porém apenas nos últimos 100 anos é que se descobriu o seu valor econômico e utilidade, pois passou a liderar a matriz energética mundial. O petróleo bruto serve de matéria prima para diversos derivados de grande importância econômica na cadeia produtiva da maior parte dos países industrializados, fornecendo desde insumos agrícolas até a energia termoelétrica. Nossas necessidades de consumo de petróleo experimentam dia após dia um aumento contínuo.

- **Sistema de Produção numa Jazida Petrolífera**

O sistema de produção de petróleo inicia-se com a sua extração através dos poços, sendo depois realizado o transporte por meio de oleodutos até as refinarias. Para a produção de seus derivados, o petróleo passa em geral por mais de uma refinaria até chegar ao consumidor final. O primeiro passo neste processo consiste em purificar em uma planta de pré-processamento o petróleo extraído, para daí encaminhar às refinarias de petróleo. Este trabalho trata do transporte do petróleo extraído dos poços até a planta de pré-processamento.

Ao longo dos anos de exploração de uma jazida, a pressão natural positiva existente no interior dos poços devido aos processo de formação das capas de petróleo diminui, de forma que se faz necessário bombear o petróleo do subsolo até as estações de captação de petróleo.

Estando os poços ligados às estações de captação mais próximas de seu setor, o fluxo de material lavrado “multifásico” (o petróleo extraído do subsolo emerge à superfície na forma de uma mescla: água salgada, gás natural e petróleo bruto) é gerido por um equipamento próprio de coleta (manifold). Neste equipamento é centralizada a produção proveniente de diversos poços de petróleo e então o fluído é enviado para a estação de coleta em que este encontra-se ligado.

Cada estação de coleta é provida de unidades de separação de líquido/gás, cada fase recebendo um tratamento específico. No caso do petróleo, toda estação conta com um tanque de armazenamento de fluídos ligado a rede de dutos principal que conduz o petróleo até uma planta de pré-processamento de petróleo (PPP).

O gás, ao sair da unidade de separação, passa por um processo onde terá a umidade relativa reduzida, seguindo diretamente para um compressor. Na sequência, o gás é direcionado para um gasoduto que segue paralelamente ao oleoduto cujo destino será a PPG (planta de processamento de gás rico). Na PPG ocorre o tratamento onde se extrai do gás rico diversos subprodutos do gás natural. Chamamos de gás rico aquele gás que contém uma mescla de onde se pode extrair butano, pentano, isopropano e metano. Até finais dos anos 70 todo o gás extraído dos poços de petróleo era queimado na atmosfera, através de um processo conhecido como “*venteio*”, dado o seu pouco valor econômico na época.

A PPP não pode ser considerada como uma refinaria propriamente dita pois, numa refinaria teríamos fases voltadas ao processo químico de onde obteríamos os mais diversos produtos derivados do petróleo. Na realidade, a PPP efetua apenas um controle sobre níveis de especificação química do petróleo a ser vendido, ou seja, a diminuição do percentual da água junto ao petróleo e sua salinidade via processos físico-químicos. De uma forma geral, o produto deverá estar dentro das seguintes especificações: apresentar no máximo 1% de água e impurezas, sendo permitido até 100 gramas de sal por m³. Essa análise das

propriedades e qualidade do petróleo são realizadas de acordo com um conjunto rígido de normas fixado como padrão pelo API (American Petroleum Institut) e pela ASTM (American Society for Testing and Materials).

É interessante observar que em conjunto à separação física, ocorre a adição de reagentes químicos cujo foco de ação é a decantação de resíduos e separação de sais, para que o produto a ser vendido esteja dentro das especificações.

Na etapa física do processo de tratamento do óleo na PPP, seria ideal a minimização dos estados transientes de ingresso do petróleo, pois uma variação no fluxo do petróleo na PPP dificulta o procedimento da fase de separação. Operacionalmente este sistema de transporte está sujeito a uma série de restrições, tais como: capacidade de armazenamento dos tanques, capacidade e características das bombas, e máxima pressão suportada pelos dutos. O problema da operação deste sistema se resume então em determinar quais bombas irão operar a cada intervalo de tempo, de modo que todas as restrições sejam satisfeitas e a vazão de alimentação da PPP apresente pouca variação.

- **Meio ambiente**

Até a década de 70 a água que era separada do petróleo, por não possuir valor econômico, era normalmente jogada na superfície do solo ou eventualmente em rios próximos às instalações de tratamento do petróleo, sem haver maiores preocupações com os danos do meio ambiente. Entretanto, com os desequilíbrios climáticos da década de 80 e o crescente interesse de preservação ao meio ambiente, este procedimento mudou radicalmente.

Seguindo as normas ambientais da área de petróleo, ISO 14001, a água extraída da mescla do petróleo passou a ser reinjetada nos poços de onde foram extraídas, evitando-se o seu despejo a céu aberto. Esta água antes de ser reinjetada, requer uma filtragem cuidadosa pois a existência de resquícios de areia ou resíduo sólido seria o suficiente para causar a perda de um poço de petróleo avaliado em milhões de dólares. Isto ocorre por que a

estrutura do subsolo de onde se extraí o petróleo trata-se de uma matriz de rocha porosa, e eventuais resíduos vedam os orifícios por onde o petróleo precisa escoar para a extração.

Este trabalho é justificado para uma empresa que pretenda manter uma boa aceitação do seu produto pois, mercados internacionais exigem da operadora de petróleo a certificação ISO 14001 quando fecham um pedido de compra. Além do aspecto ambiental, esta reinjeção serve para a manutenção de pressão dos poços – pressão que estimula a extração do petróleo, processo conhecido como recuperação secundária. Esta recuperação secundária de poços pode se realizar também pela reinjeção de gás natural, conhecido por *gaslift*.

• O transporte

Nas jazidas de extração de petróleo é comum a existência de poços perfurados a dezenas e às vezes a centenas de quilômetros de distância dos equipamentos que deverão realizar o processamento químico deste produto bruto.

Há duas fases de transporte do petróleo: a primeira que é de transportar o petróleo desde o poço até as refinarias, e a segunda que consiste em transportar os seus derivados até o consumidor final. O processo de refino é complexo, podendo em alguns casos o produto ser transportado através de diversas refinarias até que o produto acabado seja obtido.

Oleodutos

O transporte através de dutos data do período romano, quando utilizavam-se sistemas hidráulicos para levar água até as populações de centros urbanos da época. Hoje vemos a utilização do transporte de produtos alimentícios e produtos químicos através de tubulações, dado sua praticidade e viabilidade econômica.

Um dos investimentos mais altos na estruturação da capacidade de escoamento de petróleo via dutos está na fase da construção de sua rede de dutos. Após esta construção, pode ocorrer deficiências na capacidade de escoamento da rede devido a um aumento

expressivo na vazão, isto devido a um mal dimensionamento no projeto, ou a um crescimento expressivo de demanda, ou mudanças nos requisitos operacionais. Os gastos envolvidos num redimensionamento desta rede são extremamente altos.

Este redimensionamento pode se realizar com a troca de bombas por outras com novas capacidades, o que geralmente obrigaria a uma substituição de dezenas de quilômetros de dutos. Tal operação é muitas vezes inviável e adiada não só pelo custo envolvido mas, também pelos transtornos causados com uma parcial paralisação na linha de produção.

1.2 O estado da arte

É extenso o número de publicações a respeito de pesquisas aplicadas a sistemas ligados ao transporte e produção de hidrocarbonetos, dada a sua importância econômica na sociedade industrializada.

Bobok [2] utilizando-se de um sistema de fluxo anular, onde mesclava água com reagentes químicos a um petróleo de densidade pesada, minimizou os gastos envolvidos no transporte em dutos de uma jazida petrolífera situada na Hungria. O seu modelo possibilitou uma diminuição no esforço realizado pelas bombas no envio do fluido até o ponto de processamento.

Um sistema de regras de aprendizagem e algoritmos genéticos (AG) foi empregado por Goldberg [9], para acompanhar a operação de uma rede de dutos, onde foi avaliado o fluxo de gás e seu comportamento durante alterações na operação no conjunto de compressores utilizados.

Um sistema especialista foi empregado por Sun [27] para otimizar a operação de gasodutos, utilizando regressão linear e lógica fuzzy e técnicas de inteligência artificial. O modelo decide qual o melhor momento para ligar ou desativar determinado compressor na rede de dutos, diminuindo assim custos com os transporte.

Reis [19] utilizou AG na resolução de problemas de configuração na localização de válvulas utilizadas no transporte de fluídos em dutos, assegurando um melhor controle operativo do sistema de bombeamento.

Flaniga [8] realizou a otimização na operação de compressores empregando as seguintes ferramentas matemáticas: o Método de Newton-Raphson e a Interpolação Lagrangeana, para a modelagem e otimização do modelo, tendo utilizado-se da fórmula de Panhandle para efetuar o cálculo de perda de carga. Com o programa desenvolvido conseguiu minimizar as perdas de cargas necessárias para o transporte do gás através de uma rede de dutos.

A utilização de lógica fuzzy por Rocha [21] possibilitou o desenvolvimento de um sistema especialista aplicado a condições reais para auxílio a tomada de decisões, voltada a extração de petróleo e ativação de poços sob condições climáticas áridas ou condições de exploração desfavoráveis, evitando acidentes causados por erros quanto à pressão incorreta em tais poços e a respectiva perda de produtividade, dado a morosidade com que se realizam tais análises sem o auxílio deste sistema.

Foi desenvolvido por Alegre [20] um sistema de redes neurais onde é realizado o reconhecimento de padrões para inferir o comportamento da vazão em poços e determinar a melhor forma de operação das bombas de extração do fluído.

A identificação do regime de fluxo bifásico foi proposto por Ishii [12], onde realizando a análise das imagens captadas por um sensor, conseguiu através de redes neurais determinar com maior precisão a melhor forma de operação para um sistema de controle de bombeamento vertical.

Taylor [28] utilizando técnicas de simulação de sistemas conseguiu analisar o comportamento de uma linha de transporte de gás em condições transientes, o que possibilitou a escolha de uma melhor configuração quanto à operação de seus compressores.

No trabalho utilizando programação dinâmica realizado por Sant'Ana [22] constatou-se a viabilidade de uma melhor distribuição dos compressores utilizados no Gasoduto

Bolívia Brasil. Os resultados mostraram que teria sido possível economizar 3% na construção do gasoduto, diante de um estudo mais extensivo em projeto.

1.3 Sistema de produção da Petrolera Perez Companc – área Entre Lomas

Os dados utilizados para testes e validação do modelo são provenientes de um campo petrolífero localizado ao sul da Argentina, na região da Patagônia, província de Neuquén

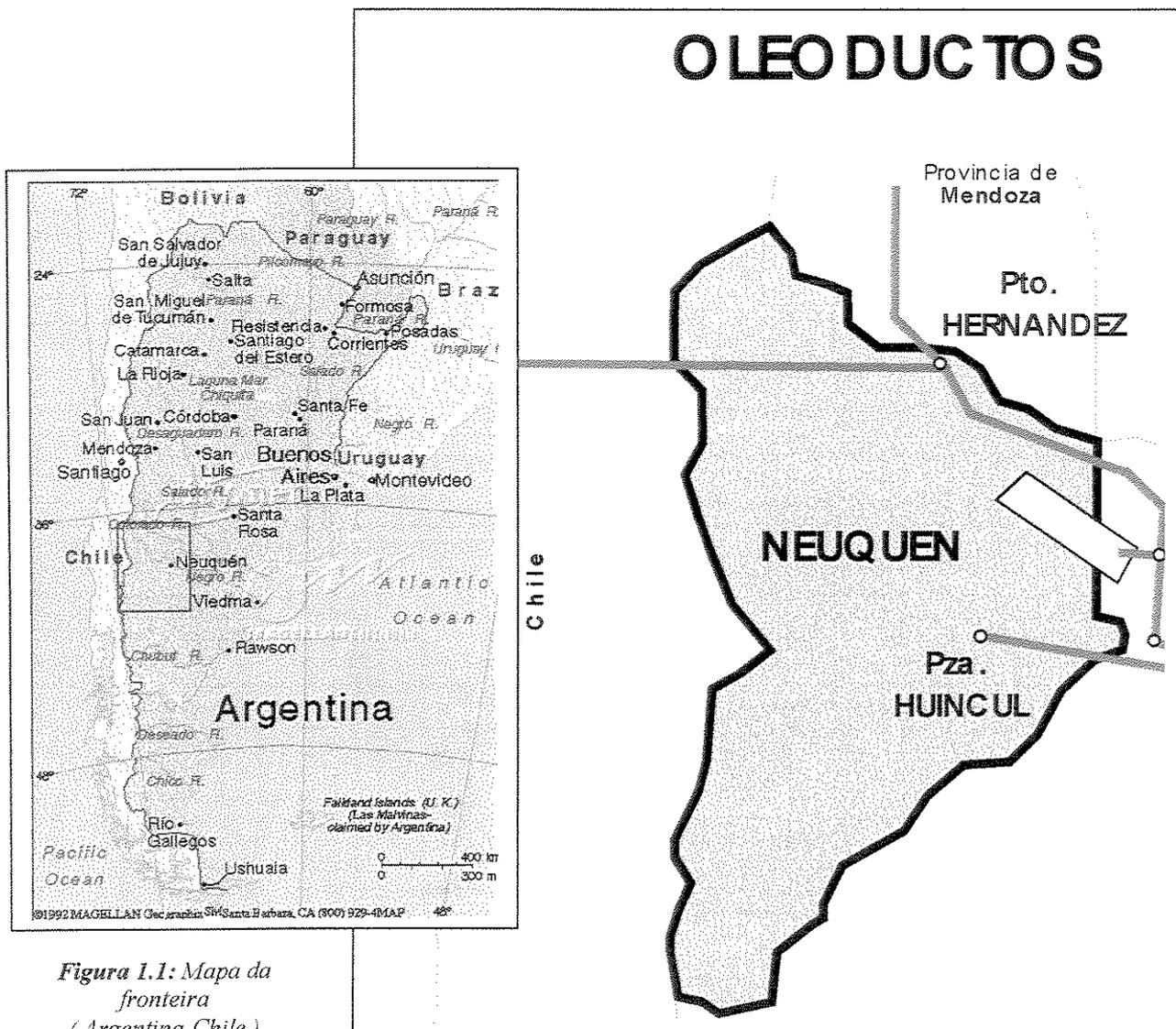


Figura 1.1: Mapa da fronteira (Argentina-Chile)

Figura 1.2: Mapa da província de Neuquén - Patagonia (área petrolífera: retângulo em branco no mapa)

(figuras 1.1 e 1.2). Foi realizado o estudo de uma jazida localizada na província de Neuquén, que ocupa uma área de aproximadamente 3192 km² (76 por 42 km) cuja rede de dutos interliga 16 estações de coleta distribuídas estrategicamente ao longo desta área.

A Petrolera Perez Companc S.A. forneceu todas as informações necessárias para a elaboração do modelo matemático e colocou-se à disposição quanto ao esclarecimento de eventuais dúvidas que foram surgindo no decorrer da pesquisa, autorizando inclusive a sua citação nas publicações realizadas a respeito deste trabalho. É uma empresa que conta com aproximadamente 2000 poços em operação somente nas áreas espalhadas pelo território Argentino, possuindo também diversas jazidas em outros países da América Latina, estando cada campo de extração petrolífera sob distintas condições de operação.

1.3.1 Descrição das estações de coleta de petróleo e da configuração da rede

Todas as estações de coleta contam com bombas que podem operar com vazão sempre superiores à vazão média que ingressa nos tanques. Na figura 1.3 faz-se a comparação, para cada tanque, entre a capacidade de vazão das bombas e a vazão (média) de alimentação do reservatório, considerado um cenário de meia hora.

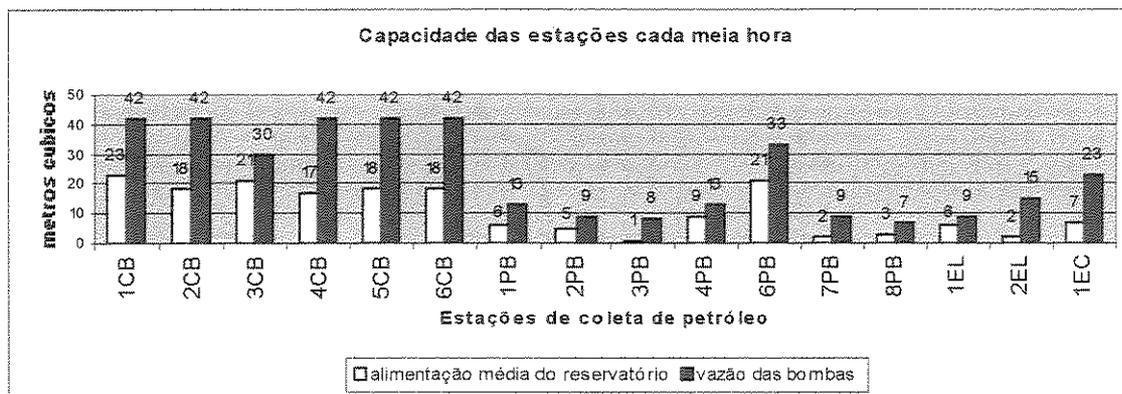


Figura 1.3: Produção dos poços

Essas estações de coleta possuem tanques que armazenam a produção de diversos poços, sendo possível visualizar as suas localizações na figura 1.4. A figura apresenta também a rede de dutos e as suas características relativas às dimensões de cada ramo.

No momento a empresa não conta com nenhum estudo feito com qualquer método, para minimizar a variação na vazão.

Automação

Atualmente os campos petrolíferos contam com um alto grau de automação. Desta forma, é possível controlar unidades de coleta e envio do petróleo até a PPP totalmente operadas por telemetria, funcionando automaticamente 24 horas de forma ininterrupta.

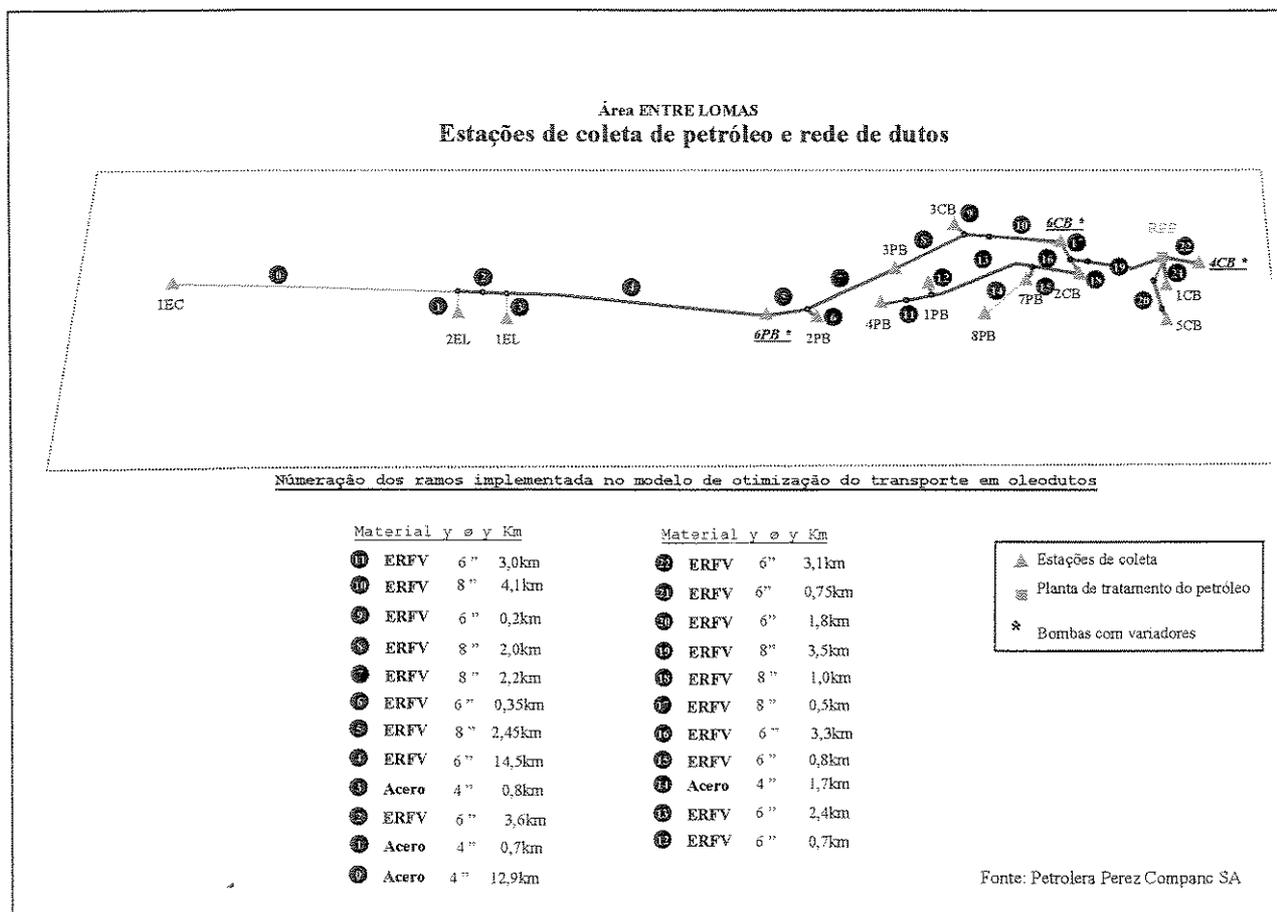


Figura 1.4: Layout do oleoduto

Nas estações de captação, há um sistema de acionamento das bombas para que realizem o envio do petróleo armazenado nos tanques, mantendo um nível entre 65% e 75% de sua capacidade. A empresa utiliza este nível por motivos de gerenciamento e segurança, pois na situação da quebra de uma bomba, os técnicos contam com um intervalo de tempo para efetivar os reparos necessários, antes de ser atingida a capacidade máxima de armazenamento dos tanques com problemas para a remessa do óleo. No caso da impossibilidade de uma estação de captação realizar o envio do óleo acumulado no seu tanque, a rede ainda conta com outras 15 estações funcionais para atender a demanda de processamento da PPP.

No modelo proposto, como veremos adiante, será adotada outra margem operacional quanto aos níveis máximo e mínimo de capacidade para os tanques.

Por um sistema chamado SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), é realizado à distância o monitoramento de cada unidade de coleta do petróleo. Esse sistema recebe uma leitura a cada 5 minutos de medidores que transmitem por rádio qual a condição de pressão nas tubulações, o nível dos tanques de coleta do petróleo, acionando e desligando a operação de envio de cada uma das bombas.

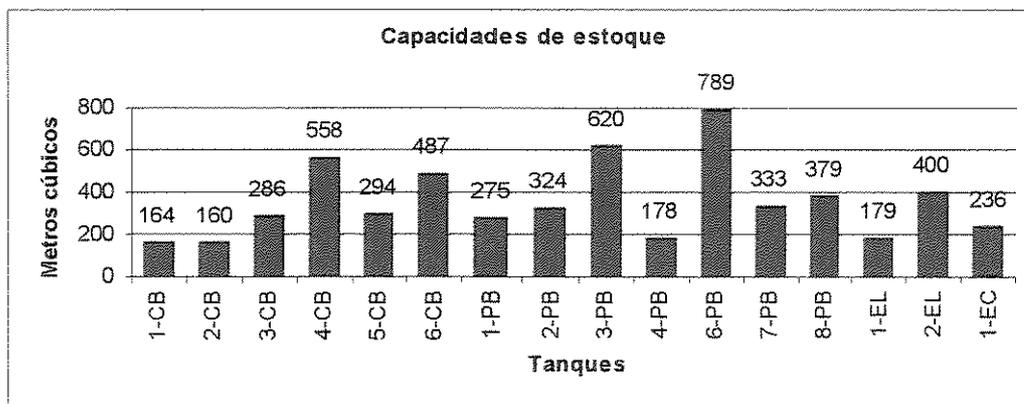


Figura 1.5: Capacidade de estoque por tanque

No momento, esse sistema de automação não conta com nenhum critério otimizador para priorizar uma fila de ativação das bombas que remetem o petróleo até a PPP. A única regra adotada para a operação das bombas é o de se atender primeiro as baterias mais

cheias, respeitando as restrições de limite de pressão das tubulações. Como resultado, a PPP sofre variações muito bruscas do fluxo de petróleo a ser tratado no decorrer do dia. Desta maneira pode haver um ingresso alto de petróleo em um determinado instante e logo a seguir, um período de baixo ingresso para o mesmo processamento deste fluido.

O sistema de transporte apresenta variações na vazão superiores a 12%, de alimentação na PPP (figura 1.6). Para a realização do transporte do petróleo, cada uma das 16 estações de coleta na rede possui uma bomba, a qual eleva a pressão do petróleo no ponto de partida, ou seja na saída das estações de coleta (ou ainda na boca de recalque da bomba) para que o fluido escoe até a PPP.

A maior parte dessas bombas permite apenas dois modos de operação: ligado, desligado. No todo, a rede possui 13 estações com bombas que apresentam esta característica. As 3 bombas restantes operam com variadores de frequência, o que permite uma variação contínua no fluxo de petróleo bombeado, sempre que haja a necessidade.

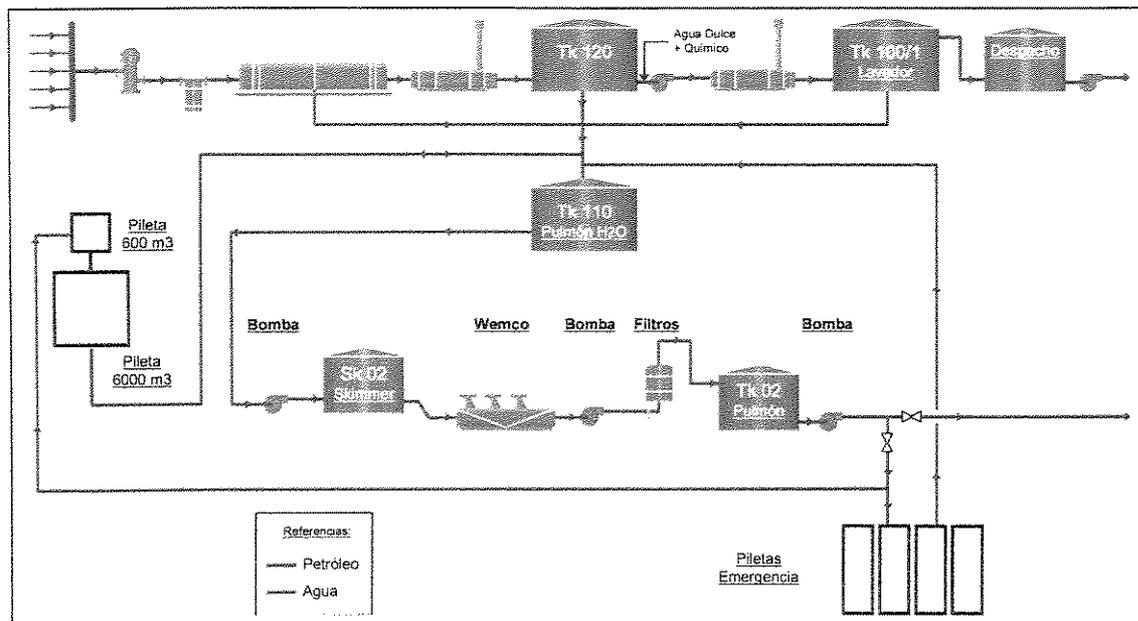


Figura 1.6: Layout da PPP

Por questões de segurança, cada estação de coleta conta sempre com dois tanques de emergência de igual capacidade ao tanque em operação. Tal medida serve para que nas

emergências, existindo a necessidade da paralisação no envio do petróleo pela rede, não seja necessário paralisar a extração de petróleo de qualquer um dos poços. A extração contínua dos poços é motivada não só pelo aspecto econômico mas, principalmente, havendo a necessidade de paralisar um poço, a sua reativação gera uma série de problemas e trabalhos operativos extras.

O modelo leva em consideração o volume em estoque por estação de coleta de petróleo, como uma unidade composta com seus respectivos tanques e a sua referida bomba, ou seja, o problema contará com 16 unidades a serem monitoradas.

1.4 Mecânica de fluídos

Visando a otimização do sequenciamento e o transporte de petróleo, ao aplicar um conjunto de heurísticas, o modelo simula e acompanha o envio do óleo por uma rede de tubulações partindo das estações de coleta até a PPP. Num trajeto com quilômetros de extensão, são avaliados aspectos como pressão no interior dos dutos e a vazão resultante. O modelo desenvolvido atende as principais leis de mecânica dos fluídos. Segundo Campbell [3], pode-se calcular o comportamento de uma rede de dutos de petróleo observando-se os fatores:

Equações:

A partir de uma formulação simplificada da Primeira lei da Termodinâmica, é escrita a seguinte equação:

$$\int VdP + g\Delta X + \frac{(\Delta v)^2}{2} = -W_f + W \quad (1.1)$$

Onde :

V = volume específico do fluido

P = pressão do fluido

g = aceleração da gravidade

ΔX = mudança de elevação do fluido

Δv = mudança da velocidade do escoamento

W_f = trabalho específico (trabalho por unidade de vazão mássica bombeada)
dissipado (efeito viscoso)

W = trabalho específico realizado pela bomba

O trabalho dissipado por efeito viscoso em uma tubulação é diretamente proporcional à energia cinética do escoamento, ao seu comprimento L , e inversamente proporcional ao diâmetro D . O fator de proporcionalidade é denominado fator de atrito.

$$W_f = 4f \frac{L}{D} \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad (1.2)$$

onde:

f = fator de fricção, proporcionalmente constante.

O fator de atrito é uma função do número de Reynolds do escoamento, e da rugosidade relativa da tubulação,

$$f = \left(R_e, \frac{e}{D} \right) \quad (1.3)$$

Na equação (1.3) R_e é o número de Reynolds e e é a rugosidade da parede interna da tubulação. A partir da combinação das equações (1.1) e (1.3), e assumindo que o volume específico do fluido é constante ($V = \text{constante}$) e dividindo todos os termos por g , é obtida para a aceleração da gravidade:

$$W = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta X + \frac{\Delta v^2}{2g} + 4f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (1.4)$$

que é a equação básica utilizada amplamente no cálculo de transporte de fluídos.

O fator de fricção “f” deve ser avaliado a partir de correlações, como as obtidas pelo diagrama de Moody, que expressa o fator de fricção “f” como um valor em função ao Número de Reynolds, e da rugosidade da tubulação. O valor do número de Reynolds irá determinar se o fluxo é turbulento ou laminar.

É possível utilizar diferentes equações, conforme Streeter [25], onde a obtenção do fator de fricção esteja dentro das seguintes categorias:

a) Equações onde o fator de fricção “f” é uma constante numérica (fórmula de: Rix, Pole, etc)

b) Equações onde o fator de fricção “f” é uma função do diâmetro interno do duto (fórmula de: Spitglass, Weymouth, Unwin, etc).

c) Equações onde o coeficiente de fricção é uma função somente do número de Reynolds (fórmula de: Pandhandle, Blasius, etc).

d) Há algumas equações onde o fator “f” é uma função do número de Reynolds e do diâmetro interno da tubulação (fórmula de: Fritzsche, etc.).

O número de Reynolds , é expresso da seguinte forma:

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu} \quad (1.5)$$

onde:

d = diâmetro interno do ramo

v = velocidade

ρ = densidade

μ = viscosidade dinâmica

Com estas equações básicas em qualquer conjunto de unidade, é possível realizar cálculos para determinar:

- 1 - Diâmetro de tubulações
- 2 - Vazão no ramo e no sistema
- 3 - Queda de pressão no ramo e no sistema
- 4 - Potência da bomba instalada.

Passo 1 – Identifique todos os ramos enumerando-os de acordo com a seqüência/direção que a vazão segue rumo ao ponto de entrega;

Passo 2 – Enumere em cada ramo o número de ramos que são imediatamente seu predecessores, identificando-os;

Passo 3 – Efetue sequencialmente os cálculos de queda de pressão na rede:

ramo \leftarrow 0

Faça

Se “n_ramos_predecessores” = 0

é um ramo produtor:

Se bomba = ligada

$P_1^{ramo} \leftarrow$ pressão da saída da bomba

Senão

$P_1^{ramo} \leftarrow$ 0

Senão

É um nós em um ramo intermediário, portanto resolva o sistema:

$P_2 \leftarrow P_1^{ramo-1} - \Delta P^{ramo-1} - \Delta X$

$P_2 \leftarrow P_1^{ramo-2} - \Delta P^{ramo-2} - \Delta X$

$P_1^{ramo} \leftarrow P_2$

ramo \leftarrow ramo+1

Enquanto ramo < Total_de_Ramos

Passo 4 – Fim

Figura 1.7: Pseudocódigo da rotina de cálculo de pressões

No estudo em questão, não será realizada a alteração de bombas, nem ampliada a configuração das presentes instalações. A rede de dutos já encontra-se dimensionada, sendo somente necessário o cálculo das pressões exercida pela vazão do petróleo no atual sistema de transporte, averiguando os pontos críticos.

Na figura 1.7 é apresentado o algoritmo implementado para o cálculo de pressões do sistema de transporte.

CAPÍTULO 2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 Introdução

Este trabalho trata do problema de escoamento do petróleo bruto, extraído de poços e armazenado em tanques, até uma planta de pré-processamento de petróleo (PPP). A função desta refinaria é retirar água e sal que vêm juntamente com o petróleo, para daí encaminhar o petróleo à outras refinarias para a produção dos derivados. Para que o processo de separação, constituído de processo químicos e físicos, seja mais eficaz é importante que a vazão de alimentação desta refinaria com o petróleo extraído apresente pouca variação. O objetivo é desenvolver uma metodologia para determinar um programa de operação dos tanques de modo que a vazão de alimentação da refinaria seja o mais constante possível.

2.2 Formulação do problema

Apresentamos a seguir uma formulação matemática para este problema, e o propósito deste modelo é determinar um programa de operação de todas as bombas, considerando um horizonte de curto prazo a princípio, de um dia a uma semana à frente. O cenário considerado é o de um campo composto de n tanques, cada um pertencente a uma estação de coleta, sendo que cada estação de coleta conta uma bomba. Algumas estações possuem bombas com controle de rotação; há uma rede de dutos que interliga os tanques à refinaria, cada trecho desta rede tem uma capacidade de escoamento; supõe-se também conhecida a produção média dos poços durante o período de estudo e com isso supõe-se conhecida a quantidade média de petróleo extraído que será armazenada em cada tanque por unidade de tempo; o período de estudo será discretizado em T intervalos de tempo, a princípio de mesma duração. Como para bombas sem controle de rotação temos dois estados possíveis :

desligada ou operando com a frequência nominal, então, em termos matemáticos isto caracteriza um problema com variáveis inteiras (booleanas) para designar estes únicos dois estados.

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^T (y_1^t + y_2^t) \quad (2.1)$$

Sujeito a :

$$y_1^t + y_2^t = x_0^t - m \quad ; t = 1, T \quad (2.2)$$

$$x_j^t = \sum_{i \in I(j)} x_i^t \quad ; j = 0, n; \quad t = 1, T \quad (2.3)$$

$$p_j(x_j^t) = \varphi_j(x_j^t) \quad ; j \in L; \quad t = 1, T \quad (2.4)$$

$$x_i^t = \mu_i^t x_i^{\max} \quad ; i \in N \quad ; \quad t = 1, T \quad (2.5)$$

$$\mu_i^t x_i^t \leq x_i^{\max} \quad ; i \in C; \quad t = 1, T \quad (2.6)$$

$$e_i^{t+1} = e_i^t + z_i^t - x_i^t \quad ; t = 1, t; i = 1, n \quad (2.7)$$

$$e_i^{\min} \leq e_i^t \leq e_i^{\max} \quad ; t = 1, T; i = 1, n \quad (2.8)$$

$$p_{ki}^t \leq p_k^{\max} \quad ; k \in L; \quad t = 1, T \quad (2.9)$$

$$\mu_i^t \in \{0, 1\} \quad ; \quad t = 1, T \quad (2.10)$$

Onde :

t, i, j : índices de tempo, tanque e ramo respectivamente.

T : número de períodos correspondentes a determinado cenário.

- N : conjunto dos tanques com bombas sem variador de frequência.
 C : conjunto dos tanques com bombas com variador de frequência.
 L : conjunto dos ramos da rede de dutos.
 y_1, y_2 : respectivamente o excesso e déficit em relação à vazão média m desejada.
 x_j^t : vazão média que passa pelo ramo j durante o intervalo t .
 x_i^t : vazão média bombeada pelo tanque i durante o intervalo t .
 x_0^t : vazão de alimentação total recebida pela PPP durante cada intervalo.
 e_i^t : volume armazenado no tanque i ao final do intervalo t .
 z_i^t : quantidade de petróleo armazenado no tanque i durante o intervalo t .
 m : vazão média desejada de alimentação da PPP durante cada intervalo de tempo.
 $I(j)$: conjunto dos ramos que injetam vazão diretamente no ramo j .
 $p_j(x_j^t)$: pressão no ramo j quando por ele passa uma vazão x_j^t .
 $\varphi_j(x_j^t)$: função que fornece a pressão no ramo j em função de x .
 μ_i^t : variável booleana que indica se a bomba i está ligada (1) ou não (0) no intervalo t .

As variáveis y_1^t e y_2^t representam respectivamente o excesso e o déficit durante o intervalo t em relação à vazão média de alimentação desejada, com isso a função objetivo penaliza tanto o excesso quanto o déficit; a equação (2.2) calcula o desvio em relação à vazão média desejada; a equação (2.3) fornece a vazão no ramo j em função da vazão dos ramos cujas vazões alimentam diretamente o ramo j ; a equação (2.4) calcula a pressão em um dado ramo; a restrição (2.5) representa as bombas sem controle; as restrições (2.6) representam os limites de vazão para as bombas com controle; a restrição (2.7) é a equação dinâmica dos volumes armazenados nos tanques; a restrição (2.8) fixa os limites de armazenamento no tanque i ; a restrições (2.9) são os limites dos ramos em termos de pressão máxima suportada.

Supondo que o intervalo de discretização seja de meia hora, e um campo com 10 bombas, isto resultará em um problema com 480 variáveis inteiras para um período de 24 horas, o que torna inviável a sua resolução através de metodologias de otimização mista. Resta, portanto, procurar uma solução sub-ótima através de soluções heurísticas. A alternativa adotada neste trabalho consistiu em decompor T subproblemas, que serão resolvidos sequencialmente.

2.3 Metodologia Proposta

A metodologia proposta consiste de um procedimento híbrido, no qual a resolução do problema é decomposto em T subproblemas, um para cada intervalo de tempo, sendo que estes subproblemas são resolvidos sequencialmente a partir do primeiro intervalo de tempo até o último intervalo.

Cada subproblema é resolvido em duas etapas. O primeiro passo é determinar quais bombas irão atuar neste intervalo de tempo. Na segunda etapa determina-se quanto exatamente cada bomba irá escoar durante o intervalo de tempo. A primeira etapa trata somente do problema com variáveis inteiras, e a segunda etapa trata somente das variáveis contínuas. Neste trabalho a primeira etapa é resolvida através de metodologia baseada em algoritmos genéticos (AG) e a segunda etapa é resolvida utilizando-se modelos de programação linear (PL). Ao primeiro subproblema denominamos **escolha das bombas** e o segundo subproblema denominamos **despacho das bombas**.

A idéia do subproblema de escolha das bombas é escolher quais bombas serão ativadas num dado intervalo de tempo, procurando priorizar o esvaziamento dos tanques mais cheios, evitar a sobrecarga nos dutos e distribuir a vazão bombeada de modo a manter equalizado o armazenamento dos tanques nos diversos ramais que compõem a rede de dutos. Quanto ao segundo subproblema o objetivo é determinar em que velocidade cada uma das bomba escolhidas com controle deve operar, de modo que a vazão de alimentação seja o mais próximo possível da vazão média desejada.

Na figura 2.1 apresentamos o algoritmo elaborado para a resolução do problema proposto. No *passo 2* são realizados todos os procedimentos de AG, na seleção de quais são as bombas que deverão ser ativadas para o envio do petróleo. Sendo o algoritmo genético um método populacional onde se geram populações de soluções, após a análise de todas estas soluções geradas, é obtida a melhor combinação de bombas para determinado instante, considerando-se todas as restrições do sistema de transporte de petróleo.

No *passo 3* é efetuado o despacho das bombas. Na execução deste passo, o programa implementado executa uma rotina dinâmica de ligação com o CPLEX, um pacote de

otimização utilizado na resolução do problema (veja exemplo da implementação no Anexo A).

PSEUDOCÓDIGO DO ALGORITMO

Passo 1 – Iniciar os tanques a $\alpha\%$ de sua capacidade, $t = 1$

Passo 2 – Escolha das bombas para o intervalo t

Passo 2.1 – Ativar um conjunto de bombas para funcionamento no intervalo t e calcular:

- O desvio da vazão por ramal em relação a sua produção média
- O cálculo de fluxo do Petróleo, obtendo o ponto com a pressão crítica na rede de dutos
- O desvio da vazão total em relação a meta estabelecida

Passo 2.2 – Avaliação da solução, devendo ser adotada a de melhor valor

Passo 3 – Despacho das bombas no intervalo t

Determinar a vazão das bombas selecionadas, de forma a minimizar o desvio em relação à vazão de alimentação desejada

Passo 4 – Atualizar os volumes das baterias:

$$Volume^t = Volume^{t-1} + Input^t;$$

Se a bateria foi ativada:

$$Volume^t = Volume^t - Output^t;$$

Passo 5 – Se $t < T$, $t = t+1$:

Voltar ao passo 2 para definir as bombas ativadas no intervalo de tempo subsequente;

Passo 6 – Fim.

Figura 2.1: Algoritmo que integra AG com PL para o transporte de petróleo

No *passo 4*, após executado o PL (problema de Programação Linear), realiza-se uma atualização dos volumes em cada tanque para iniciar a próxima iteração no instante t , influenciada pela decisões tomadas em $t-1$.

No *passo 5*, é finalizada a execução após um número de cenários que representem T intervalos de tempo, no ciclo real de produção do campo de petróleo.

CAPÍTULO 3. ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 Introdução

Os Algoritmos Genéticos (AG) têm por base heurísticas de busca adaptativa baseada nas idéias evolucionárias da seleção natural e da genética. Eles têm a capacidade de obter boas soluções até mesmo quando a dimensão do problema cresce, e por esta razão têm sido aplicados com sucesso em uma variedade de problemas NP-Completo e NP-Árduos [17,10].

Os Algoritmos Genéticos foram introduzidos em meados de 1976 por *John Holland* [11] e seus colaboradores da *Universidade de Michigan*, contudo o seu pleno desenvolvimento só ocorreu a partir da última década. Embora recente, estas técnicas têm alcançado enorme sucesso na solução de problemas de elevada complexidade.

Classificados na literatura como Metaheurísticas, os algoritmos genéticos têm solucionado deficiências históricas dos algoritmos convencionais de busca heurística, como por exemplo, o problema de paradas prematuras em ótimos locais distantes da melhor solução em problemas de otimização.

Uma parcela importante dos problemas de tomada de decisão consiste em alguma forma de busca : dada uma certa coleção de elementos, deseja-se encontrar nela um ou mais elementos que atendam a algumas condições previamente especificadas.

Assim, imagine uma solução qualquer desejada para um problema combinatorial, onde partindo de uma solução factível, possamos alcançar uma outra combinação que resulte para o nosso problema numa solução mais eficiente. Este estudo em busca da combinação ótima se realiza através da análise de um conjunto de soluções possíveis ao problema em questão.

Os processos de resolução dos problemas de busca dependerão fortemente do ambiente no qual esta busca se dá e das condições a serem satisfeitas pela solução. Entretanto, qualquer algoritmo de busca requer pelo menos:

- Uma forma de representar possíveis soluções para o problema;
- Operadores capazes de gerar novas soluções candidatas;
- Geração de uma solução candidata;
- Teste da solução candidata.

De acordo com sua generalidade, os algoritmos de busca podem ser classificados como fracos, quando podem ser aplicados a uma gama variada de problemas, ou fortes, quando são projetados para aplicações mais específicas, fazendo uso de uma quantidade maior de informações que são disponíveis para tal situação.

À medida que aumenta o conhecimento sobre o espaço de procura, especializam-se os algoritmos de busca para este espaço, com o aumento de eficiência e perda de generalidade, ou seja, pode-se passar de algoritmos mais fracos para algoritmos mais fortes.

Outra classificação importante é quanto à inclusão ou não de algum componente probabilístico no algoritmo. Quando alguma decisão é tomada a partir do valor de um número gerado aleatoriamente diz-se que o algoritmo é probabilístico ou estocástico, e, em caso contrário, ele é dito determinístico. No primeiro caso, o gerador de números aleatórios é sempre inicializado com algum valor (fornecido pelo usuário, por exemplo) e, assim, cada execução do algoritmo pode, em princípio, levar a um resultado diferente.

Para exemplificar duas características desejáveis, mas em geral conflitantes num algoritmo de busca, considere o problema enfrentado por uma companhia de petróleo. Numa primeira fase, ela deve ser capaz de identificar em diversas regiões - seu espaço de busca - aquelas áreas mais promissoras no que tange à existência de petróleo de qualidade e em quantidade adequada. É a etapa de diversificação, ou perfuração de novos poços.

Mas isso não é tudo. Uma vez localizada uma região promissora é necessário, de maneira eficiente, retirar a maior quantidade possível de petróleo utilizando o mínimo possível de recursos. Esta etapa recebe o nome de intensificação, ou levantamento artificial da pressão dos poços. Assim, um algoritmo de busca deverá ter também a melhor combinação possível de suas capacidades de diversificação e intensificação.

Em otimização, uma boa capacidade de diversificação do espaço de busca é requerida se é desejado encontrar um extremo (máximo ou mínimo) global, ou pelo menos, uma boa solução.

No AG o operador do tipo cruzamento realiza a recombinação de duas soluções, que servirão de matriz para uma nova solução em problemas combinatórios. Normalmente este operador apresenta características de intensificação na busca pela melhor solução, pois há um maior incentivo para a recombinação e geração das novas soluções filhas, a partir de soluções pais que sejam as mais promissoras. Esta intensificação tende a gerar uma perda acentuada de diversidade, que é continuamente compensada por um processo de mutação, aplicado sobre as soluções filhos.

A mutação altera o estado de alguns dos componentes de uma solução. Ao elaborar o algoritmo para a mutação, pode-se determinar o tipo de mutação: mutação pesada ou mutação simples. No caso do problema em estudo foi aplicado a mutação simples, onde inverte-se o estado de apenas um dos componentes em uma dada uma solução. A escolha é aleatória tanto de qual componente quanto de quais soluções sofreram ou não a mutação, como será visto mais adiante.

Assim, quando há uma diminuição da diversidade nas soluções, ou seja, a população realmente convergiu para uma região próxima a um mínimo local, o AG busca a diversificação, saindo deste mínimo local através do processo chamado “mutação pesada”. Veremos mais detalhadamente logo adiante o processo de “cruzamento” e “mutação”.

É aí que entram os Algoritmos Genéticos, que têm como uma das suas principais características a facilidade de não ficar preso a mínimos locais, explorando uma gama muito maior de pontos, podendo com isso chegar com mais chances a mínimos globais.

Os AG constituem uma classe de ferramentas muito versátil e robusta que são utilizados na solução de problemas de otimização.

AG	Matemática
1 população de soluções / indivíduos / cromossomos	1 conjunto de soluções
1 cromossomo	1 solução
1 gene	1 componente de uma solução

Tabela 3.1: Termos utilizados em AG e a suas associações dentro da matemática

Para facilitar a notação, mostramos na Tabela 3.1, algumas relações entre termos usados nos AG e suas associações dentro da matemática.

<p>AG genérico</p> <p>início</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gerar a população inicial (de n indivíduos) • Avaliar os indivíduos na população <p>Enquanto a geração não convergir</p> <p style="padding-left: 40px;">repita</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Selecione</i> dois pais da geração atual para reprodução • <i>Aplique</i> operadores genéticos (de recombinação aos pais) para produzir filhos • <i>Avalie</i> os novos indivíduos • <i>Insira</i> os novos indivíduos na população, substituindo os indivíduos antigos <p style="padding-left: 40px;">até algum critério de parada ser satisfeito.</p> <p>fim</p> <p>fim</p>
--

Figura 3.1: Pseudo-código de um algoritmo genético.

Um AG aplicado a um determinado problema consiste basicamente dos seguintes componentes :

- Uma representação genética das soluções viáveis do problema.
- Determinar uma população de cromossomos.
- Definir uma função de avaliação de cromossomos
- Definir um operador genético eficaz na criação de novos cromossomos.

→ Definir parâmetros usados nos AG tais como : tamanho da população, critérios de parada, critérios de renovação de cromossomos, etc.

Um pseudo-código capaz de descrever de forma genérica a maioria dos AG existentes é mostrado na figura 3.1 .

3.2 Detalhes de Implementação de um AG

- **Representação e Codificação das Soluções Viáveis**

A primeira etapa para se resolver um dado problema utilizando um AG consiste no estabelecimento de um esquema de codificação / representação para cada elemento do espaço de busca em questão, já que os AG não operam sobre tais elementos diretamente, e sim sobre uma codificação dos mesmos. Os AG podem ser construídos utilizando-se de uma codificação dita *real* para as variáveis, o que é bastante natural, já que as mesmas são, por definição, contínuas. Normalmente uma solução de um problema está associada a um cromossomo \mathbf{p} representado na forma de um vetor ou uma lista no \mathbb{R}^n : $\mathbf{p} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ onde cada x_i representa um gene (ou uma variável real que caracteriza a solução do problema).

Uma vantagem da codificação real é o fato de, em geral, ser mais intuitivo conceber operadores de cruzamento (*crossover*) e de mutação para um dado problema lançando mão de conhecimento já previamente adquirido no domínio da aplicação.

Para o caso do exemplo no sistema da Petrolera Perez Companc, um cromossomo representará a configuração das bombas em operação em um dado instante. Como temos 16 bombas, então o cromossomo será representado por um vetor de 16 elementos, cada elemento correspondente ao estado de cada bomba pertencente a um tanque. O valor “1” indica que a bomba está em operação, e “0” caso contrário (figura 3.2).

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estado	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0

Figura 3.2: Representação do estado das bombas conectadas ao oleoduto

- **População Inicial de um Algoritmo Genético**

A população de um AG é um conjunto de soluções viáveis (representadas na forma de cromossomos) para um determinado problema. O procedimento de gerar uma população inicial para um AG é muito simples para a maioria dos problemas. Normalmente utilizam-se desde procedimentos aleatórios até algoritmos heurísticos para este fim. Por exemplo, introduzindo-se na população inicial um ou mais indivíduos “interessantes”, como soluções aproximadas conhecidas ou contendo algum tipo de informação prévia.

Cada execução de um AG pode ser replicada no computador bastando para isto fornecer a mesma “semente” para o algoritmo gerador de números aleatórios. Um valor diferente da semente dá origem a uma outra seqüência de números aleatórios e, conseqüentemente, uma nova população inicial. Para dar uma idéia do comportamento de um AG numa dada aplicação, é comum computar-se estatísticas para um conjunto de resultados correspondentes a diferentes valores da semente. Note que independentemente do valor da “semente” utilizada, um AG robusto deve sofrer pouca influencia dos mecanismos aleatórios, retornando sempre soluções de boa qualidade.

- **Função de Avaliação de Cromossomos**

Esta função é responsável pelo processo de classificação dos cromossomos e deve indicar a qualidade de cada cromossomo na população. Fazendo um paralelo com a programação matemática, ela é equivalente à função objetivo que se deseja minimizar ou maximizar.

A análise da função objetivo deve se realizar de forma que, através de sucessivas amostragens ao longo do processo evolutivo, forneça indicações sobre a localização do ótimo. Por exemplo, uma função de avaliação que retorna um valor unitário para a única solução do problema (como a combinação que abre um cofre) e zero para qualquer outra tentativa é incapaz de guiar a busca. A busca se torna completamente cega e todos os algoritmos são equivalentes a uma busca aleatória: encontrar a solução é uma questão de sorte.

• **Operadores Genéticos**

Uma vez definida a representação dos elementos da população é possível construir operadores genéticos que, atuando sobre uma população de cromossomos, produzam novos indivíduos.

O desenvolvimento de operadores genéticos está muito ligado à representação de uma solução do problema original na forma de um cromossomo. Isso significa, que dada uma solução **S**, devemos codificá-la na forma de um cromossomo **p**, e após as atualizações efetuadas pelo operador genético em **p**, o novo cromossomo **p'** será decodificado para obter a nova solução **S'** do problema associado. Existem basicamente 2 tipos de operadores genéticos convencionais para gerar novas soluções:

- Operadores do tipo Mutação
- Operadores do tipo Cruzamento

O processo de escolha das duas soluções pais que participam da mutação ou cruzamento é feito através do seguinte operador:

- Operador de seleção: tipo Roleta

Operador do tipo Mutação

Um ou mais operadores de mutação são normalmente introduzidos num AG. São operadores unários que, operando sobre um dado elemento da população, produzem uma modificação que dá origem a um novo indivíduo que será avaliado posteriormente. Operadores do tipo Mutação alteram um ou mais genes de um cromossomo, baseado normalmente num processo aleatório ou baseado num esquema pré-definido. Assim se tivermos o Indivíduo (P) mostrado na figura 3.3 de nossa população, e o operador de mutação resolvesse alterar o valor de um de seus genes, neste caso tendo escolhido aleatoriamente a posição 7 para esta inversão, de forma que obteríamos o Indivíduo (P') modificado.

Posições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Indivíduo (P)	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
Indivíduo (P')	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0

Figura 3.3: Exemplo da ação de um operador de mutação

Também o operador mutação pode gerar outra nova solução P'' fazendo uma permuta entre partes de P' . Por exemplo fazendo a permuta entre os genes $x_3 = 1$ e $x_6 = 0$ gera-se P'' :

Posições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Indivíduo (P')	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0
Indivíduo (P'')	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0

Figura 3.4: Exemplo da ação de um operador de mutação

Estas operações são efetuadas de maneira que a probabilidade p_m de ocorrência de mutação de um dado gene (cromossomo) seja geralmente pequena. Esta idéia também é oriunda da Genética e visa preservar alguma diversidade genética na população que vai perdendo-a à medida que a evolução avança e os indivíduos vão se tornando mais e mais semelhantes tendendo a uma solução que, nos casos de sucesso do AG, é uma boa solução para o problema. Além disso, quando há uma perda da diversidade, lança-se mão de uma mutação pesada, onde muitos genes são alterados de uma única vez. Com isso aumenta-se a diversidade e atinge-se novas regiões do espaço de busca.

A mutação proporciona uma forma de exploração do espaço de busca já que ela gera novos indivíduos, a serem avaliados, que podem revelar novas regiões promissoras no espaço de busca.

Operador do tipo Cruzamento - Recombinação

O termo *cruzamento* é normalmente empregado na literatura que versa sobre Algoritmos Genéticos. Assim, *cruzamento* representa a geração combinatória de novas soluções a partir do cruzamento de soluções pais. O operador do tipo *cruzamento* visa promover a recombinação do material genético de, pelo menos, dois “pais” para a geração de um ou mais “filhos” que serão avaliados posteriormente.

Para o operador do tipo *cruzamento*, dois ou mais cromossomos são escolhidos e com uma probabilidade p_c , são submetidos à operação de recombinação. Uma posição do *cruzamento* é sorteada e o material genético dos “pais” é recombinado conforme o esquema da figura 3.5.

Posição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Pai A	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
Pai B	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
Filho	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0

Figura 3.5: Um exemplo genérico de crossover uniforme

No exemplo acima, as posições 2,3,6,7,9,10,12,14 e 15 possuem os mesmos valores em ambos os pais. Desta forma, os valores foram copiados automaticamente para o filho gerado. O Pai A foi selecionado para transmitir suas características nas posições 1, 5, 11 e 16. Enquanto que no Pai B foram escolhidas as posições 4, 8 e 13. Para posições onde os Pais tivessem valores distintos, a seleção foi aleatória com probabilidades equivalentes.

Operador de seleção: tipo Roleta

Consiste da escolha dos pais que participarão no *cruzamento* de forma aleatória, baseada em intervalos de probabilidade proporcionais ao valor retornado pela função de avaliação dos indivíduos de uma população.

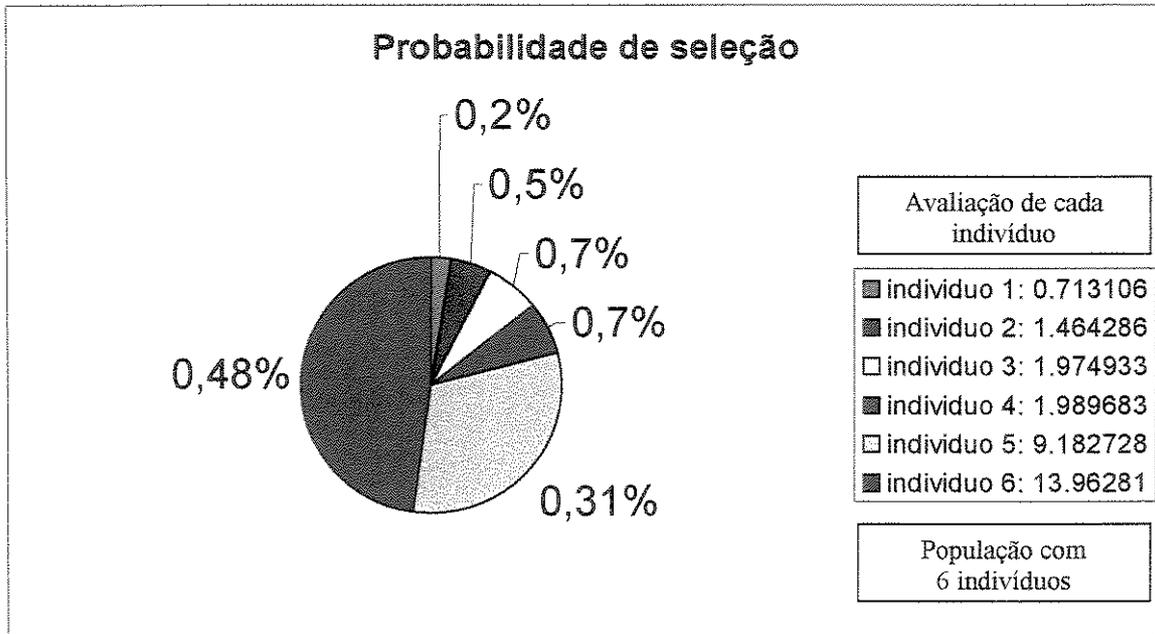


Figura 3.6: Um exemplo de escolha aleatória pelo método roleta

Na literatura clássica do AG, a função objetivo guarda uma relação estreita com a *função de avaliação*. Essa função, que mede a qualidade da solução deve ser maximizada. Assim, as soluções ou indivíduos da população que apresentem um maior valor são aquelas

que se encontram mais próximas do ponto ótimo. Por isso, falamos que tais indivíduos apresentam uma maior aptidão. A esses indivíduos a roleta atribuirá sempre uma maior chance para que sirvam de pais para o cruzamento e geração de uma nova população de soluções.

A atribuição das probabilidades para cada indivíduo é feita da seguinte forma: considere o valor da *avaliação* de todos os 6 indivíduos de nossa população na figura (3.6), onde obtemos o valor 29,28755 como sendo a somatória total de todos esses valores. Dividindo-se a *avaliação* de uma solução pela somatória total das *avaliações*, obtemos a fração da contribuição do *valor* deste indivíduo em relação ao *valor* da população.

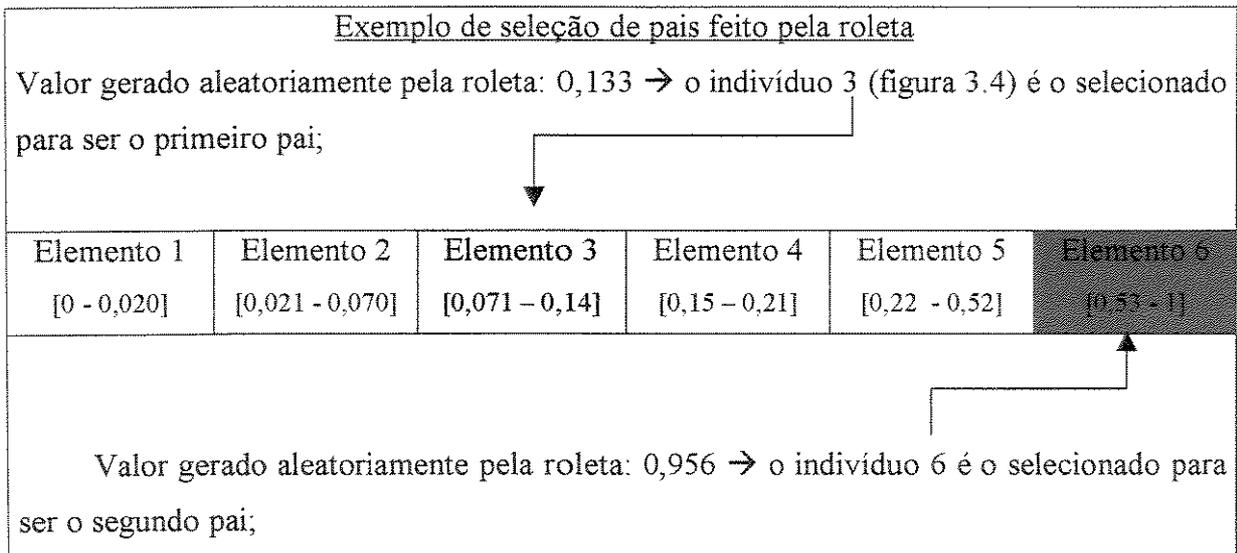


Figura 3.7: Seleção dos pais através da roleta para o próximo cruzamento

Gerado os intervalos, é obtido aleatoriamente números com uma distribuição uniforme $U[0,1]$, em que o seu valor determinará sua escolha para se tornar pai para o próximo *cruzamento* (figura 3.7). Desta forma, indivíduos melhor adaptados tendem a apresentar uma maior probabilidade de serem escolhidos.

Porém, aos indivíduos com um *valor* ruim também é permitida, com uma menor probabilidade, a oportunidade de *cruzamento*. Isto, para não incorreremos no risco de convergirmos para uma população de indivíduos iguais muito rapidamente.

De uma forma geral, sempre que nos deparamos com problemas combinatoriais pode-se afirmar uma performance satisfatória dos Métodos Heurísticos [30]. Onde na maior parte

das vezes, com um custo computacional relativamente baixo se encontram excelentes resultados para uma grande gama de problemas.

- **Definição dos parâmetros nos Algoritmos Genéticos**

A questão principal deste item se refere à definição do tamanho da população que deve ser utilizada no AG. Testes experimentais mostram a princípio, que quanto maior for a população, melhores serão os resultados alcançados. Mas, por outro lado, quanto maior a população, maiores serão também os tempos computacionais exigidos por iteração.

Outro parâmetro importante, também presente em muitos AG, é o número de iterações. Como o parâmetro anterior (tamanho da população), este também está ligado à relação melhora do custo *versus* maior consumo de tempo. Em um AG existem vários outros parâmetros, como por exemplo:

- Taxa de recombinação: determina-se um percentual da população que fará recombinação em cada geração;

- Taxa de mutação: é fixado a probabilidade de um indivíduo sofrer mutação em um de seus genes para cada geração.

A especificação destes parâmetros na maioria das vezes é específico ao problema que está sendo tratado. O que tem ocorrido na prática é usar o bom senso e o conhecimento prévio do problema para a definição dos parâmetros nos AG.

Este conhecimento prévio tem levado a crer que parâmetros que apresentem bons resultados geralmente apresentam taxas de recombinação altas (60 a 80%), enquanto para mutação o ideal são taxas bem menores (menores que 5%).

CAPÍTULO 4. PROGRAMAÇÃO LINEAR

Veremos neste capítulo uma das ferramentas mais populares na área de modelagem matemática: a programação linear. Portanto, teremos uma breve descrição sobre a história da PL (Programação Linear), e a apresentação do Método Simplex.

4.1 História da Programação Linear

George B. Dantzig, em 1947, iniciou o estudo de problemas de programação linear, num período em que trabalhava para Força Aérea do Estados Unidos, o que resultou no desenvolvimento do Método Simplex.

T.C. Koopmans, em 1951, foi quem sugeriu a utilização pela primeira vez do termo “Programação numa estrutura Linear”[5]; expressão que veio a se consagrar como Programação Linear.

Diversos pesquisadores tem contribuído para o amadurecimento da programação linear, desde sua aparição. Muito tem sido feito quanto a se aprimorar sua teoria matemática, com a criação de novos algoritmos. Novas possibilidades para a utilização deste método tem sido uma constante.

O grande número de pesquisas focalizando métodos de otimização linear explica-se devido a sua enorme aplicação. São inúmeros os problemas presentes na indústria, economia, medicina entre outras áreas, que tem contado com resultados ótimos devido a utilização da programação linear.

Geralmente são evitados algoritmos com tempo de convergência exponencial, sendo que teoricamente o método Simplex possui tempo de convergência exponencial para análise de pior caso. Porém, na maioria das aplicações onde vemos a utilização do Simplex, verifica-se que o método conta com um bom desempenho. Assim, podemos deduzir que na

realidade sua convergência na maior parte dos problemas é bem mais rápida do que a convergência do pior caso.

L.V. Kantorovich e T. C. Koopmans foram escolhidos para o Prêmio Nobel de Ciências Econômicas de 1975, por “contribuições para a teoria de distribuição ótima de recursos”[7].

L. G. Khachian concluiu que o Método dos Elipsóides encontra uma solução ótima de problemas de programação linear num tempo polinomial. Todavia, não realizou-se uma aplicação em problemas práticos para constatar esta superioridade teórica[13].

N. Karmarkar publicou em 1984 uma técnica que ficou conhecida como Método de Pontos Interiores. Esse método projetivo apresentou desempenho superior ao Simplex em alguns problemas de grande porte. A partir do trabalho apresentado por Karmarkar foram desenvolvidos novos algoritmos também inspirados numa busca a partir de uma trajetória central[6].

4.2 Método Simplex

Problemas de programação linear caracterizam-se por possuírem uma função objetivo e restrições lineares. Assim, genericamente podemos representar um problema linear como vemos na figura 4.1.

$$\begin{array}{l}
 \text{Min } z = c_1x_1 + \dots + c_nx_n \\
 \text{Sujeito a } a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\
 \quad \quad \quad a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\
 \quad \quad \quad \vdots \\
 \quad \quad \quad a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \\
 \quad \quad \quad x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0
 \end{array}$$

Figura 4.1: Forma genérica de um problema linear

Também podemos utilizar notação matricial para representar o problema apresentado na figura 4.1, como vemos a seguir:

$$\text{Min } z = c^t x \quad (4.1)$$

$$\text{s.a. } Ax = b \quad (4.2)$$

$$x \geq 0, \quad (4.3)$$

Em (4.1) o vetor c^t trata-se de um vetor transposto $c^t = (c_1, \dots, c_n)$ que representa o custo relativo a cada variável de determinado problema; a variável x em (4.3) determina a quantidade ótima de insumos a utilizar ou produtos a produzir, de forma que este vetor deve assumir sempre valores maiores ou iguais a zero; x , b são vetores colunas, como podemos ver:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

A trata-se de uma matriz que representa as restrições:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

O objetivo do Método Simplex é determinar um vetor x que satisfaça as restrições do problema e apresente o menor valor da função objetivo.

O que tornou o Simplex tão popular é a facilidade encontrada ao se manipular qualquer representação de um problema dentro de sua forma padrão.

Para a aplicação do Método Simplex faz-se necessário a decomposição do sistema (4.2) em variáveis básicas (B) e variáveis não básicas (N). Supondo posto completo (posto de $A = m$) e $m < n$, para nossa matriz A_{mn} , poderemos selecionar m colunas que formam uma matriz básica B_{mm} não singular. Assim, generalizando temos a partição de A da seguinte maneira:

$$A = [B | N], \quad x = \begin{bmatrix} x_B \\ x_N \end{bmatrix}, \quad e \quad c = \begin{bmatrix} c_B \\ c_N \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

sendo a matriz base descrita anteriormente $B \in \mathbb{R}^{m \times m}$, e $N \in \mathbb{R}^{m \times (n - m)}$ a *matriz não básica*. O vetor x_B representa as variáveis básicas, sendo as variáveis não básicas (independentes) representadas por x_N . Se reescrevermos o sistema (4.2) obtemos:

$$Bx_B + Nx_N = b \Rightarrow I_B x_B = B^{-1}b - B^{-1}Nx_N, \quad (4.7)$$

ao substituir (4.7) na função objetivo:

$$\begin{aligned} z &= c_B^t x_B + c_N^t x_N \\ &= c_B^t (B^{-1}b - B^{-1}Nx_N) + c_N^t x_N \\ &= c_B^t B^{-1}b - c_B^t B^{-1}Nx_N + c_N^t x_N \\ &= z + \sum_{j \in I(N)} (c_j - z_j) x_j, \end{aligned} \quad (4.8)$$

Diz-se que o vetor x é uma solução básica de (4.2) quando em (4.7) $x_B = B^{-1}b$ e $x_N = 0$; se $x_B \geq 0$ então, a solução básica é uma solução básica factível para o sistema.

Pelo Teorema Fundamental da Programação Linear [5] temos que, “se existe uma solução ótima para o problema, existirá uma solução básica ótima”. Assim pode-se restringir a procura de soluções ótimas ao conjunto de soluções básicas factíveis.

A interpretação geométrica de um problema de programação linear leva-nos a delimitar a região chamada região factível, através das restrições do problema que formam um conjunto convexo ($\gamma = \{x \in \mathbb{R}^n | Ax = b, x \geq 0\}$). Este conjunto convexo representa onde estão as suas soluções factíveis.

Todo ponto extremo desse conjunto corresponde a uma solução básica factível; e o Simplex “caminha” pelos pontos extremos sempre melhorando a função objetivo, até encontrar o ponto ótimo. Deve-se enfatizar que o Método Simplex não precisa explorar todos os pontos extremos factíveis para chegar à uma solução básica factível ótima.

A cada iteração a condição de otimalidade é verificada, isto é, se para cada variável não básica (x_j) o seu custo relativo ($c_j - z_j$), $j \in I(N)$ de (4.8) são maiores ou iguais a zero (ou seja, aumentam o valor da função objetivo) então a solução corrente é ótima; caso contrário uma variável não básica que melhora o valor da função objetivo se torna básica. Em seguida, são feitas as atualizações necessárias para a continuação deste processo iterativo.

Pode ocorrer de um determinado problema não possuir uma base inicial factível B . Quando isso acontece, aplicamos mecanismos que encontrem uma solução básica factível inicial que possibilitará o procedimento iterativo de buscar a solução ótima. Há vários métodos para realizar esse trabalho de localizar a base factível inicial B . Entre eles o Método das Duas Fases e o Método do Big-M [1]. Tais métodos introduzem variáveis artificiais no problema diante da falta de uma solução inicial factível.

- **Algoritmo Simplex**

O Método Simplex pode ser iniciado após ter sido encontrado uma base inicial factível com $x_B \geq 0$, $x_N = 0$. Ele é resumido na seqüência de passos abaixo.

Passo 1 – Escolher uma base inicial (Fase I).

Passo 2 – Resolva o sistema $Bx_B = b$.

$$x_B = B^{-1}b = \bar{b}, \quad x_N = 0 \quad e \quad z = c_B B^{-1}b = c_B x_B \quad .$$

Passo 3 – Calcule os custos relativos referente a todas as variáveis não básicas, ou seja:

$$c'_N - c'_B B^{-1}N = \sum_{j \in I(N)} (c_j - z_j) x_j. \quad (4.9)$$

Verifique se existe algum j tal que $c_j - z_j < 0$.

Se não existir, pare; a solução é ótima.

Senão, selecione uma variável x_k para entrar na base sendo que,

$$c_k - z_k = \min_{j \in I(N)} \{c_j - z_j\}. \quad (4.10)$$

Passo 4 – Observe a coluna k da matriz de restrições A .

Se todos os elementos dessa coluna (y_k) forem menores ou iguais a zero, $y_k \leq 0$, pare; a solução é ilimitada.

Se ao menos um elemento nessa coluna k tal que $y_k > 0$, prossiga.

Passo 5 – A variável x_k deve entrar na base; a variável de bloqueio x_r , que deixará a base deve ser identificada através do teste da razão:

$$\frac{\bar{b}_r}{y_{rk}} = \min \left\{ \frac{\bar{b}_i}{y_{ik}} \mid y_{ik} > 0 \right\}$$

Passo 6 – Atualize a matriz \mathbf{B}^{-1} efetuando operações de pivoteamento. O elemento a_{rk} deve ser reduzido a unidade, enquanto a_{ik} , $i \neq r$ é reduzido a zero.

Ou seja:

Quando $i \neq r$ faça

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} - \frac{a_{rj} a_{ik}}{a_{rk}}$$

Senão, faça

$$\bar{a}_{rj} = \frac{a_{rj}}{a_{rk}}.$$

Atualize os custos relativos e o vetor b .

Passo 7 – Repita o algoritmo a partir do Passo 3 até o processo parar no Passo 3 ou 4.

CAPÍTULO 5. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

Este capítulo apresenta a metodologia de resolução do problema de transporte de petróleo. Basicamente, o problema é resolvido através de heurística, com a decomposição em um subproblema para cada intervalo de tempo. Em cada subproblema há ainda a etapa de escolha das unidades que irão bombear em um dado intervalo de tempo, e em outra etapa faz-se o despacho das bombas selecionadas no subproblema anterior, no qual é determinado quanto cada uma das bombas selecionadas irá bombear. O primeiro subproblema trata da parte inteira do modelo e é resolvido através de AG (Algoritmos Genéticos), enquanto que o segundo cuida das variáveis contínuas e é tratado através de PL (Programação Linear).

5.1 Introdução

Tratando-se de um problema composto por variáveis inteiras e contínuas, buscamos um enfoque que procura identificar o melhor conjunto de ferramentas aplicáveis a sua resolução.

Desta maneira, na modelagem do problema, a primeira fase de otimização é caracterizada pela tomada de decisão sobre quais bombas deverão ser ou não ativadas. Optamos pela utilização de uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos, para a resolução deste problema. A função objetivo no AG busca o atendimento de vazão requerida pela PPP (Planta de Pré-processamento de Petróleo), dando prioridade aos tanques mais cheios (em relação a sua capacidade máxima); procura a minimização das pressões na rede de dutos, dada a importância desta restrição, para evitar o rompimento das tubulações; e tenta também equilibrar o armazenamento entre os diferentes ramais.

Após ser decidido qual o conjunto de bombas que será ativado observando todas as restrições, buscamos atingir a meta de vazão de alimentação requerida pela PPP a cada intervalo de tempo.

O algoritmo fornecerá ao PL uma relação das bombas que deverão ser ativadas. Para ocorrer o ajuste de vazão, a programação linear depende da existência de pelo menos uma bomba com variador de frequência presente na seleção pelo AG.

Embora o AG seja em síntese um método não-determinístico, um dos critérios para seleção de qual estação de coleta terá a bomba do tanque de armazenamento ligada é o volume de petróleo relativo à sua capacidade máxima. O modelo foi construído para tentar manter os volumes em um intervalo arbitrário entre 35% a 80% da capacidade dos tanques. Outros intervalos de capacidade para a operação poderiam ser perfeitamente considerados na simulação, embora por questões de segurança seja pouco aconselhável operar com níveis muito acima de 80%.

O AG considera as bombas providas com variador de frequência operando com sua capacidade máxima de envio. Enquanto que o PL irá ajustar as vazões das bombas com variadores de frequência selecionadas para minimizar o desvio em relação à vazão de alimentação desejada.

A implementação do modelo utilizado para o problema em estudo foi feita através da linguagem de programação C, no seguinte ambiente: compilador G++, estação Sparc IPX com 64 MB de RAM, sistema operacional SunOS 4.1.1.

5.2 Aplicação do Algoritmo Genético para a seleção de bombas

Na otimização de fluxo para a rede de oleodutos podemos fazer a representação do estado de vazão da rede de forma binária, representação mais utilizada nas aplicações das técnicas de AG. A rede é constituída de um conjunto com 16 bombas hidráulicas, onde deve-se obter a cada iteração dois subconjuntos: um com as bombas desligadas e outro com as bombas ligadas. Assim, uma representação compatível com as necessidades de implementação de algoritmos genéticos foi obtida através da utilização de um vetor de

A implementação do Algoritmo genético

Passo 1 – Gerar aleatoriamente uma população inicial de soluções

Passo 2 – Avaliar todas as soluções, guardando o melhor valor como a melhor solução

Passo 3 – Ordenar todas as soluções conforme o seu valor obtido no passo 2

Faça

Faça

Passo 4 – Aplicar o método da *roleta* para seleção de dois novos pais

Passo 5 – Gerar a nova solução a partir dos pais selecionados:

- Copiar todos os genes idênticos em ambos os pais para o filho
- Para genes diferentes:

Escolha a cada posição aleatoriamente de qual pai copiar o gene para o filho

Passo 6 – Faça mutação aleatória em 10% dos indivíduos gerados no passo 5, trocando aleatoriamente o estado de um gene da solução

Passo 7 – Insira as novas soluções no lugar dos 30% piores indivíduos, descartando as piores antigas, mesmo se o valor das novas soluções criadas seja pior que o das anteriores soluções antigas

Passo 8 – Avalie a nova solução gerada e seu valor for o melhor que a melhor solução encontrada até o momento, guarde-a como a melhor solução.

Enquanto [número novas soluções < 30% número total de indivíduos]

Passo 9 – Ordenar todas as soluções conforme o valor obtido na sua avaliação

Se [60% dos valores das soluções idênticos \rightarrow população convergiu]

- Gere uma nova população aleatoriamente
- Avalie todos os indivíduos desta nova população
- Ordenar todas as soluções conforme o valor obtido na sua avaliação

Enquanto [Condição de parada não for satisfeita]

Passo 10 – Fim

Figura 5.1: Pseudocódigo da implementação do AG

dimensão igual ao número de bombas, como pode ser observado na figura 5.2. O número “1” na posição i indica que a bomba i está ligada, e “0” caso contrário

Na figura 5.1 é apresentado um pseudocódigo resumindo o AG utilizado no problema de escolha de bombas.

Bomba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Estado	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0

Figura 5.2: Representação do estado das bombas conectadas ao oleoduto

Desta forma o espaço de soluções a ser pesquisado compõe-se de 2^n possibilidades representando os estados das bombas que alimentam a planta de produção, com $n = 16$.

Função de Avaliação

A função de avaliação no algoritmo genético torna-se o elemento evolutivo chave para a seleção de possíveis soluções. Uma boa avaliação atribuirá a uma boa solução um grau de maior adaptabilidade, e com maiores probabilidades de ser “pai” de uma nova solução no processo evolutivo. Uma boa avaliação deve evitar que o algoritmo descarte qualquer boa solução. Ou seja, é desejável um maior incentivo para as melhores soluções, representando-as com uma maior probabilidade para reprodução.

Este problema apresenta uma função de avaliação multi-objetivo, com diversos parâmetros representando diferentes aspectos da operação do sistema, entre os quais pode-se citar: a pressão em cada ramo na rede de dutos; o desvio da vazão enviada em relação à vazão de alimentação desejada; o volume dos tanques presentes na rede; a necessidade de adequação entre o envio de petróleo de cada ramal em relação a sua produção diária.

$$f = \left(\alpha.State_{OFF} + \beta.Maxpressure + |M - TotalFlow| + \sum_j |goal_path_j - flow_path| \right)^{-1}$$

Desta forma, as soluções apresentarão um maior valor para f quanto mais adequada estas forem em relação aos parâmetros acima mencionados.

Onde, na função objetivo:

- **State_{OFF}:**

É feito a somatória dos volumes futuros de todos os tanques selecionados para estarem desligados em determinado intervalo de tempo. Assim, boas soluções apresentarão os menores valores possíveis para esta variável, indicando que os tanques que estarão desligados encontram-se com os seus níveis baixos, atendendo aos padrões de segurança necessários para operação destes. Adotou-se sempre o intervalo de tempo para visualizar os estados dos tanques nas duas horas subsequentes.

- **MaxPressure:**

Na resolução é exigido que o algoritmo atribua a esta variável o ponto com a maior pressão da toda rede. Foi observado durante todas as experimentações que o sistema de transporte do petróleo operou dentro de pressões factíveis para a rede, ou seja, a máxima pressão registrada foi de 90% em relação a capacidade total suportada por um ramo.

- **TotalFlow:**

É o volume de alimentação na PPP em m^3 em um dado intervalo de tempo, calculada pelo AG com a seleção de bombas buscando convergir para um valor pré-estabelecido quanto ao envio de petróleo a cada intervalo de tempo.

• $goal_path^i - flow_path^i$:

Procura igualar a escolha das bombas por ramal, para que o montante de seu envio corresponda a sua produção relativa, de forma a equilibrar os estoques entre os ramais.

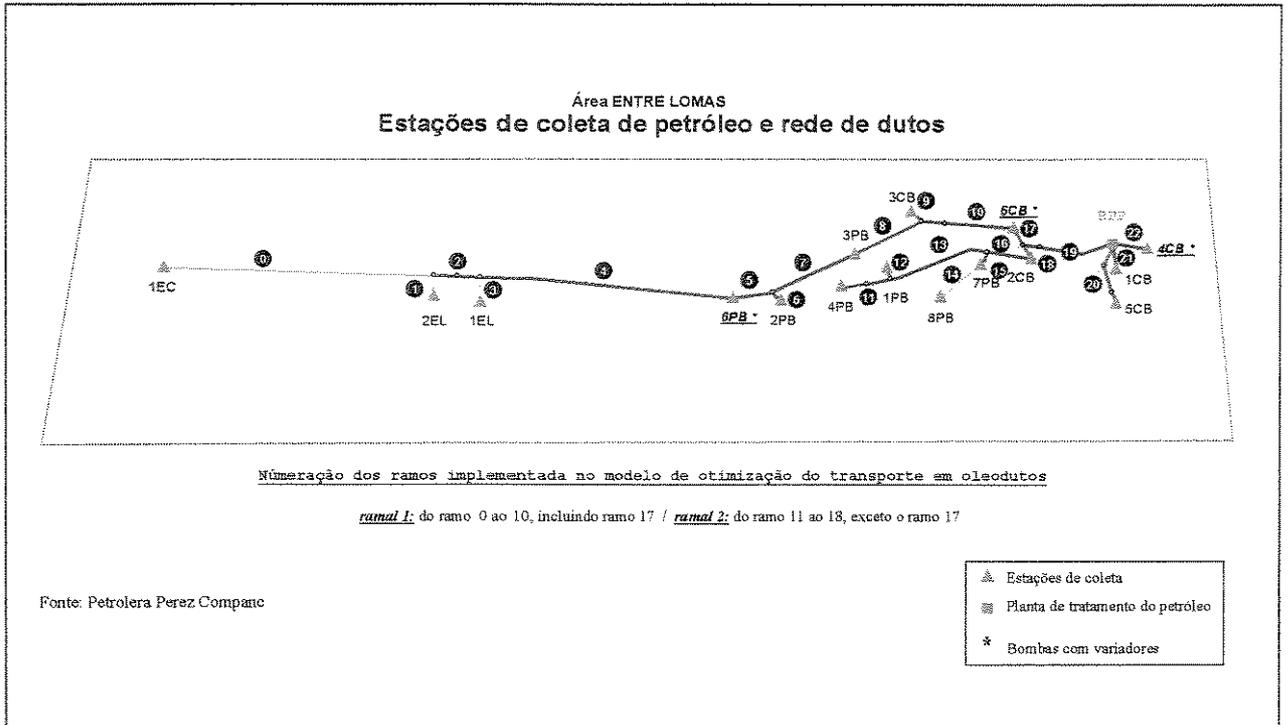


Figura 5.3: Layout da rede de dutos

Ao todo a rede apresenta 2 ramais: no ramal 1 estão as estações 1EC, 2EL, 1EL, 6PB, 2PB, 3PB, 3CB e 6CB; no ramal 2 as estações 4PB, 1PB, 8PB, 7PB e 2CB; estando as estações 5CB, 1CB, 4CB conectadas diretamente a PPP. A produtividade relativa de cada ramal pode ser vista na figura 5.4, sendo o ramal 1 o que apresenta a maior produção 46%, e a visualização simbólica do ramal três com 32%, apresentando a produção das estações 5CB, 1CB e 4CB.

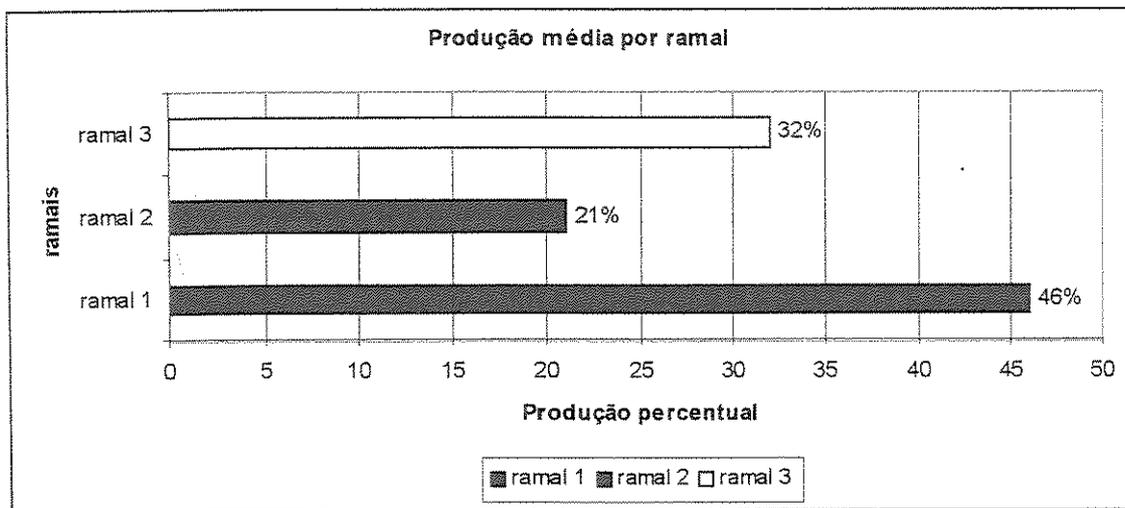


Figura 5.4: Produção por ramal

5.3 Despacho das bombas

O AG informa qual a combinação ótima de bombas em operação durante o intervalo de tempo t . No conjunto de bombas selecionadas para estarem ligadas, algumas das bombas não possuem controlador e por isso sempre operam em sua potência nominal. As bombas com controladores (variador de frequência) irão atuar de modo a atingir a vazão de alimentação desejada; o nível de operação das bombas com variador serão determinadas através da solução de um problema de PL. Assim, para manter coerência com as variáveis inteiras na modelagem, é utilizado o artifício de exigir uma vazão em x_i igual a vazão fornecida das bombas sem variadores de frequência quando operado em seu valor nominal. As bombas que contam com variadores de frequência podem variar de zero até a sua máxima potência.

Formulação do problema

A resolução do problema é proposta através de programação linear, sendo um sistema que apresenta traços de programação multi-objetivo por minimizar o desvio na vazão de

alimentação na PPP e maximizar o envio das bombas com controle, minimizando seus estoques.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^n (y_1^t + y_2^t + \sum_{j=1}^c \alpha_j e_j^t) \quad (5.1)$$

s.a.

$$\sum_{t=1}^n y_1^t - y_2^t = m - Q^t \quad (5.2)$$

$$Q^t = \sum_{j=1}^c x_j + \sum_{i=1}^p x_i \quad (5.3)$$

$$\sum_{j=1}^c \sum_{t=1}^n e_j^t + \bar{\beta}_j \leq e_j^{t-1} - x_j^t \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^n e_i^t + \bar{\beta}_i \leq e_i^{t-1} - x_i^t \quad (5.5)$$

$$x_j^t \leq x_j^{\max} \quad (5.6)$$

$$x_i^t = x_i^{\max} \quad (5.7)$$

Descrição do modelo

(5.1) Na função objetivo está sendo respectivamente minimizado o desvio em relação a vazão desejada, considerando-se a vazão de todas as bombas: com e sem variador de frequência. O segundo termo em (5.1), aplicável apenas às bombas com controle, incentiva a maior vazão das estações de coleta de petróleo que apresentem níveis de tanques mais elevados (e_i^t) proporcionalmente a sua capacidade de armazenamento (α_i).

Dado o seguinte conjunto de restrições:

(5.2) O valor de (y_n^t) representa o excesso e o déficit durante o intervalo t em relação à vazão média de alimentação desejada (m).

(5.3) A vazão total entregue a PPP em determinado instante (Q^t), será a somatória dos envios de todas as bombas naquele instante.

- (5.4) A vazão em cada bomba com variador de frequência (x_j^t) está limitada pela quantidade disponível em estoque para envio (e_j^t), mais o volume médio que esteja ingressando neste tanque (β).
- (5.5) A vazão em cada bomba sem variador de frequência (x_i^t) está limitada pela quantidade disponível em estoque para envio (e_i^t) mais o volume médio que esteja ingressando neste tanque (β).
- (5.6) A vazão de cada bomba com variador de frequência (x_j^t) para o instante t será positiva e menor ou igual a capacidade de envio de sua bomba.
- (5.7) A vazão de cada bomba sem variador de frequência (x_i^t) para o instante t será igual a capacidade nominal de sua bomba.

CAPÍTULO 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Validação do Modelo

O modelo matemático desenvolvido para a resolução do problema de transporte de petróleo foi aplicado ao sistema da Petrolera Peres Companc SA, como apresentado no Capítulo 1. Inicialmente, considerou-se um cenário no qual todos os tanques estão em operação (sistema completo), e as simulações foram efetuadas para um período de 48 horas. Para este sistema foram testado 4 diferentes intervalos de discretização (30, 60, 90 e 120 minutos). Um outro cenário considerado foi a ocorrência de contingências simples, no qual supôs-se que uma das bombas com controlador ficou todo o período fora de operação.

A vazão fixada em 177 m^3 representa sempre montante entregue a cada 30 minutos. Assim, quando forem apresentadas as intervenções no controle das bombas com discretização a cada 1 hora, 1 $\frac{1}{2}$ hora, ou 2 horas, o valor 177 m^3 representará a quantia entregue de forma constante para cada 30 minutos em relação a PPP; por exemplo: para intervenção a cada 2 horas, isto significaria $177 \text{ m}^3 \times 4$ – uma vez que duas horas compõe-se de 120 minutos (4 vezes 30 minutos).

6.2 Sistema Completo

Teste 1 : Sistema completo com discretização de meia hora

Na tabela 6.1 é mostrado o comportamento do sistema num cenário de 48 horas para uma discretização de meia hora. A 1ª linha indica os intervalos de tempo; cada intervalo de tempo corresponde a um período de 30 minutos. Na 2ª linha estão as vazões de alimentação em m^3 , determinadas pelo PL (problema de Programação Linear) e na 3ª linha estão as

vazões calculadas através de AG (Algoritmos Genéticos). As demais linhas mostram o comportamento de cada um dos tanques. Para cada tanque a primeira linha mostra o estado das bombas (ligado ou desligado) e a segunda linha apresenta os volumes armazenados ao final de cada intervalo em termos percentuais; o ingresso médio, a capacidade operativa das bombas, e a capacidade máxima de estoque em cada tanque estão descritos no Capítulo 1 (figuras 1.3 e 1.5).

Há uma diferença entre a vazão calculada pelo PL e pelo AG, pois o valor calculado através do AG supõe que todos os tanques irão bombear a sua vazão máxima. Na solução do PL estas bombas não escoam obrigatoriamente esta quantidade, pois o objetivo do PL é minimizar o desvio na vazão de alimentação. Em outras palavras, na solução do PL os tanques com controle bombeiam o suficiente para minimizar o erro na vazão de alimentação.

A solução apresentada na Tabela 6.1 obteve para todos os intervalos de tempo uma vazão de alimentação igual à desejada (2ª linha). Nesta solução todas as restrições de armazenamento, limites operativos das bombas e restrições de pressão nos dutos foram atendidas. A segunda linha da tabela 6.2 mostra para cada um dos intervalos de tempo qual o duto (ramo) com a maior pressão da rede, e a sua respectiva pressão registrada em percentuais relativos a sua pressão máxima permitida (3ª linha).

Na linha “volume” (tabela 6.1) foi atribuída uma coloração vermelha para os tanques com volume acima de 80% de sua capacidade nominal, como alerta indicando a ultrapassagem dos níveis desejáveis. A coloração amarela nas células serve para alertar o contrário: a existência de tanques muito vazios. Embora tanques com volumes baixos não indiquem uma situação grave, se comparados a tanques superlotados, não trata-se de uma situação desejada pois, o esvaziamento excessivo sem acompanhamento pode chegar a extremos com o bombeamento de ar, dado um tanque vazio. Há entretanto, um outro aspecto de maior importância no acompanhamento de tanques com níveis baixos: a escolha excessiva e desnecessária de um tanque para entrar na solução sobrecarrega tanques mais cheios, que deveriam estar sendo escalados para enviarem seus estoques. Tal situação ocorre no algoritmo quando um tanque mais cheio ao entrar na solução, causa um aumento na pressão do sistema hidráulico se comparado com uma com pressão menor mas com um volume relativamente mais baixo.

1/2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	
total	AG	180	180	180	181	199	185	183	215	188	180	199	185	186	180	220	192	179	208	181	181	185	187	235	180	
4PB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	
	volume	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	57	62	61	59	57	
1PB	bomba	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	
	volume	66	69	71	70	69	72	71	70	69	69	71	70	69	69	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	
7PB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
	volume	63	64	63	62	63	62	63	63	64	64	65	66	66	65	66	66	66	67	66	65	66	66	67	68	68
2CB	bomba	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0
	volume	60	56	51	47	43	54	50	45	41	52	48	43	55	50	46	41	53	48	44	55	51	46	42	53	
5CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	63	61	59	58	56	54	53	51	49	47	46	44	42	41	39	45	43	42	40	38	44	43	41	39	
1CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	
	volume	60	57	53	50	46	42	39	35	31	45	42	38	34	48	45	41	37	34	48	44	40	37	33	47	
4CB	bomba	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
	volume	67	67	70	69	72	71	71	71	70	69	72	72	71	70	71	71	70	69	68	72	71	70	73	72	
6CB	bomba	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	
	volume	62	66	69	73	71	68	72	69	73	71	68	72	69	73	71	68	72	69	73	71	68	72	70	68	
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	volume	63	63	62	61	61	60	59	59	58	57	56	56	55	54	54	53	52	52	51	50	50	49	48	47	
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	volume	65	65	65	65	65	65	66	66	66	66	66	66	67	67	67	67	67	67	68	68	68	68	68	68	
2PB	bomba	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	
	volume	66	67	67	66	68	69	71	70	70	69	70	70	69	69	70	70	69	70	70	69	71	70	70	69	
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	volume	63	62	61	60	61	61	60	63	62	61	63	62	62	61	63	64	62	65	64	63	62	62	65	64	
1EL	bomba	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	
	volume	68	67	67	66	65	69	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	
2EL	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	volume	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	68	69	69	70	68	69	69	70	68	69	69	70	68	69	
1EC	bomba	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	
	volume	67	70	69	72	72	71	70	69	72	71	70	69	72	72	71	70	69	72	71	70	69	72	72	71	
8PB	bomba	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	
	Volume	65	64	63	64	65	65	66	67	68	67	68	68	68	69	68	69	70	69	69	70	69	70	69	69	

Tabela 6.1.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora)

1/2h	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
total	AG	180	207	188	183	205	180	178	212	232	190	180	188	179	201	181	181	206	179	191	192	183	191	197	180
4PB	bomba	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	56	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	57
1PB	bomba	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70
7PB	bomba	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	67	68	69	69	70	69	69	70	69	70	69	69	69	69	68	67	68	69	69	70	69	69	70	69
2CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	49	45	40	51	47	43	54	50	45	41	36	48	43	55	50	46	41	53	48	44	55	51	46	42
5CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	45	44	42	40	39	45	43	41	40	38	44	42	41	39	45	43	42	40	38	44	43	41	39	38
1CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
	volume	43	40	36	32	46	43	39	35	32	46	42	39	35	31	45	42	38	34	48	45	41	37	34	48
4CB	bomba	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
	volume	72	71	70	70	69	72	71	71	74	73	72	72	71	70	70	69	72	71	70	70	69	72	71	71
6CB	bomba	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	volume	71	69	73	70	68	65	69	73	70	68	72	69	73	70	68	72	69	73	70	68	72	69	73	70
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	47	46	45	45	44	43	43	42	41	40	39	46	46	45	44	44	43	42	41	41	40	39	47	47
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	69	69	69	69	69	69	70	64	64	65	65	65	65	65	65	65	66	66	66	66	66	66	67	67
2PB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1
	volume	70	70	69	71	70	70	69	70	70	69	71	70	70	69	70	70	69	70	70	69	70	69	70	69
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	62	65	65	64	66	65	63	66	69	69	68	67	66	68	67	66	68	67	67	67	66	67	68	67
1EL	bomba	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	volume	70	69	73	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	70	69	73
2EL	bomba	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0
	volume	67	68	68	69	69	70	68	69	69	70	68	69	69	70	68	69	69	68	68	69	67	68	68	69
1EC	bomba	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
	volume	70	69	72	71	70	69	72	72	71	70	69	72	71	70	69	72	72	71	70	69	72	71		

1/2h	instante	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
vazão total	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
	AG	180	180	206	192	180	185	203	181	190	179	226	180	197	179	180	189	197	239	180	182	227	180	180	180
4PB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	57
1PB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	69	68	70	69	72	71	70	69	69	71	70
7PB	bomba	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	volume	68	69	69	70	69	70	69	68	69	68	68	67	68	67	66	67	67	68	69	68	68	68	69	69
2CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
	volume	53	49	45	40	36	47	43	54	50	45	41	52	48	43	39	50	46	41	53	48	44	55	51	46
5CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	44	42	40	39	45	43	41	40	38	44	42	41	39	45	43	42	40	38	44	43	41	39	45	44
1CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	44	40	37	33	47	43	40	36	32	46	43	39	35	32	46	42	39	35	31	45	42	38	34	48
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	volume	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71	73	72	72	71	70	70	69	72	71	70	73	72	71	71
6CB	bomba	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0
	volume	68	72	69	73	70	68	72	69	73	70	68	65	69	73	70	68	72	75	73	70	68	71	69	73
3CB	Bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	Volume	46	45	45	44	43	43	42	41	40	40	39	46	46	45	44	44	43	42	41	41	41	40	39	47
3PB	Bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Volume	67	67	67	67	68	68	68	68	68	68	69	69	69	69	69	69	70	64	64	65	65	65	65	65
2PB	Bomba	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	Volume	71	70	70	69	70	70	69	69	70	70	69	70	70	69	71	70	70	69	70	70	69	69	68	67
6PB	Bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Volume	65	64	66	67	66	65	67	66	66	65	67	66	67	66	65	65	66	69	67	67	69	68	67	66
1EL	Bomba	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	Volume	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	70	69	69	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71
2EL	Bomba	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
	Volume	67	68	68	69	69	70	68	69	69	70	68	67	67	68	68	69	69	70	68	69	69	68	68	69
1EC	Bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	Volume	69	72	71	70	69	72	71	70	69	69	72	71	70	69	72	71	70	69	69	72	71	70	69	68
8PB	Bomba	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1
	Volume	68	69	70	69	68	68	69	68	69	68	69	68	68	69	70	69	70	69	69	70	69	70	69	68

Tabela 6.1.3: Comportamento em dois dias (intervenções a cada meia hora)

1/2h	instante	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
vazão total	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
	AG	199	187	189	183	180	187	235	197	180	181	179	208	183	180	205	180	220	180	208	180	179	180	180	200
4PB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
	volume	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	64	62	61	59	57	62	61	59	64
1PB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	volume	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	72	71	70	69	69	71	70	69	69	68	70
7PB	bomba	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	volume	69	70	69	69	69	69	70	69	69	70	69	70	69	68	69	68	68	67	66	67	68	68	69	69
2CB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
	volume	42	53	49	45	40	51	47	43	54	50	45	41	52	48	43	55	50	46	41	53	48	44	55	51
5CB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	42	40	39	45	43	41	40	38	44	42	41	39	37	43	42	40	38	44	43	41	39	45	44	42
1CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	45	41	37	34	48	44	40	37	33	47	43	40	36	32	46	43	39	35	32	46	42	39	35	31
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	volume	70	69	72	72	71	70	73	72	72	71	70	69	72	71	70	72	71	70	69	72	72	72	71	70
6CB	bomba	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
	volume	70	68	71	69	73	70	68	72	70	67	71	68	72	70	67	71	68	72	70	67	71	68	72	70
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	volume	45	45	44	43	43	42	41	40	40	39	46	46	45	44	44	43	42	41	41	40	39	47	46	45
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	65	65	66	66	66	66	66	66	66	67	67	67	67	67	68	68	68	68	68	68	69	69	69	69
2PB	bomba	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0
	volume	69	70	70	69	69	70	70	69	70	69	71	70	70	69	68	70	69	71	70	70	69	68	70	69
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	67	67	67	66	65	65	67	68	67	66	65	67	67	65	67	66	69	68	70	69	68	67	66	67
1EL	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	volume	70	70	69	73	72	71	70	69	73	72	72	71	70	70	69	73	72	72	71	70	71	70	70	69
2EL	bomba	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0
	volume	69	70	68	69	69	70	68	69	67	68	68	69	67	68	68	67	67	66	66	67	65	64	62	63
1EC	bomba	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
	volume	71	70	69	72	72	71	70	69	68	71	70	69	72	72	71	70	69	68	71	70	69	72	72	71

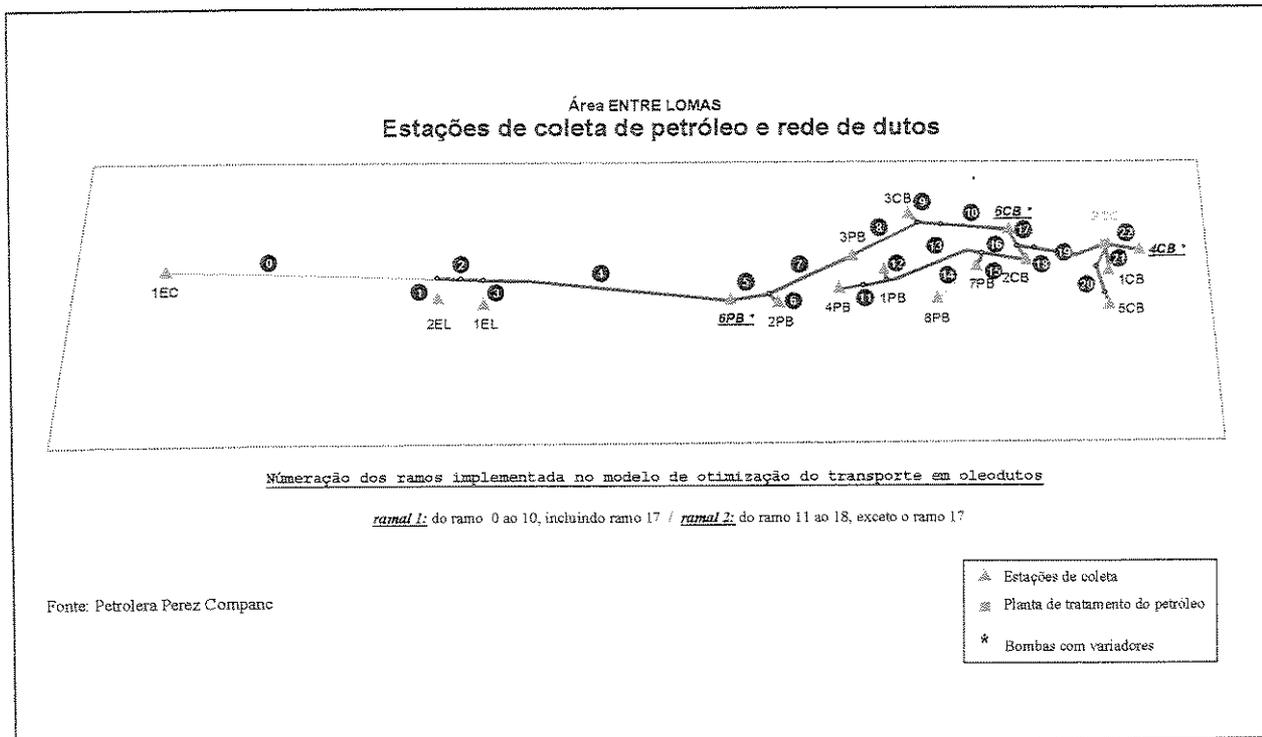


Figura 6.1: Layout da rede de dutos

1/2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
crítico	Ramo	5	5	7	7	5	5	5	7	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	10	7	5	7	10	7
	pressão	64	66	77	72	66	66	66	77	72	77	66	77	68	77	66	77	77	66	85	73	66	72	85	77
crítico	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	Ramo	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	10	5	7	7	5	7	7
crítico	pressão	66	77	68	66	77	77	77	66	77	73	66	72	77	77	66	72	73	85	66	77	77	66	77	73
	instante	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
crítico	Ramo	5	7	7	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	7	7	5	7	7	10	7	7
	pressão	66	72	77	77	66	72	78	77	66	77	77	66	77	77	64	77	77	77	66	72	73	85	77	77
crítico	instante	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
	Ramo	5	5	10	7	7	5	10	7	5	7	7	5	7	7	7	10	5	7	5	7	10	7	10	5
crítico	pressão	66	66	85	68	77	66	85	77	66	72	73	66	77	77	77	85	66	78	66	77	85	77	85	66

Tabela 6.2: Pressão máxima na rede (intervensões a cada meia hora)

Na tabela 6.1 as bombas com variadores de frequência estão com as correspondentes células com tons em cinza. O mesmo critério é empregado para a apresentação dos valores de todas as tabelas apresentadas nos demais intervalos de intervenção. Veja a figura 6.1 se desejar situar o comportamento das pressões no layout da rede; a pressão máxima é de 35 kg do ramo 0 ao ramo 4, e 75 kg nos demais ramos. A avaliação do comportamento da rede de dutos deixa claro a existência de alguns pontos com maior pressão, que são os dutos 5, 7 e 10 (tabela 6.2), destacando-se que o ramo 10 atingiu a maior pressão, 85%. Isto é um fato facilmente compreensível se observado que

46% da produção deve necessariamente passar pelo ramal 1 para atingir a PPP (Planta de Pré-processamento de Petróleo).

Todos os tanques foram inicializados com os volumes a 65% de sua capacidade de armazenamento. Na figura 6.2 temos o comportamento dos tanques 5CB e 1CB que apresentam uma alta produção, a 6CB que é uma estação com variador de frequência e a 3PB que trata-se de um tanque com uma produção baixa. Da análise do comportamento dos volumes armazenados nota-se que após alguns intervalos de tempo, quando dilui-se o efeito da condição inicial, os volumes apresentaram-se bastante estáveis.

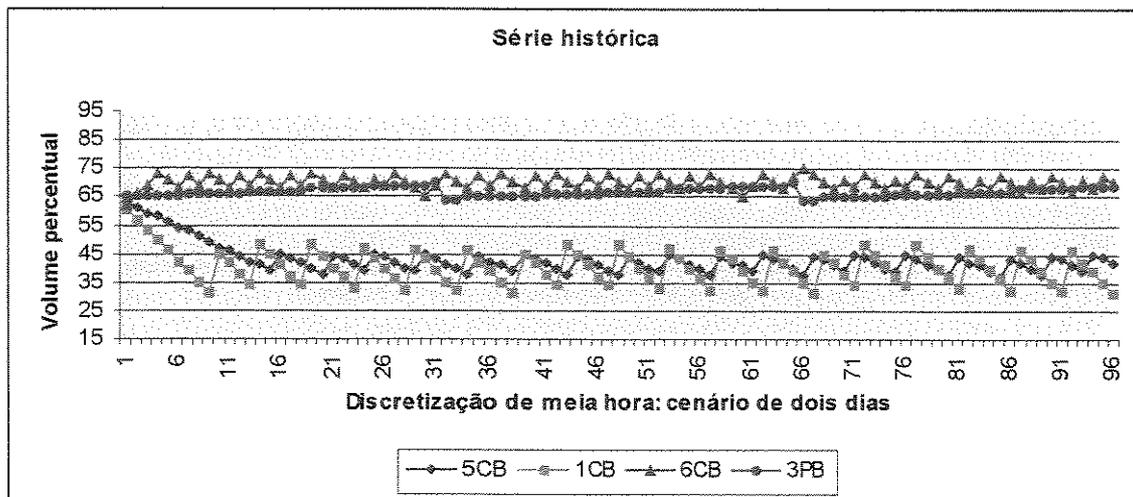


Figura 6.2: Série histórica de tanques representativos

A grande maioria dos tanques está operando com seus volumes entre 65% e 75% de suas capacidade (figura 6.3), sem nunca ultrapassar os 75%. Na operação atual do sistema da Petrolera Peres Companc o patamar de 75% da capacidade dos tanques é considerado extremamente seguro. Nota-se também que há poucas ocorrências com volumes abaixo de 35%.

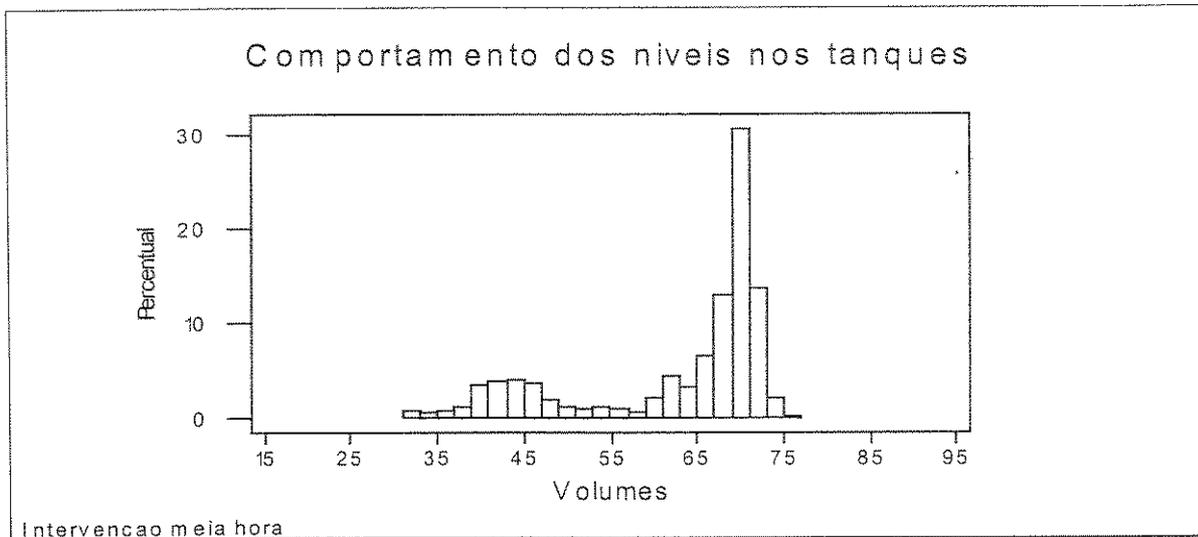


Figura 6.3: Histograma de volumes

Observou-se num cenário de 48 horas que o número médio de partidas por bomba foi igual a 19,46 – um bom resultado: o número médio no sistema em operação é de 24,01.

Teste 2 : Sistema completo com discretização de uma hora

Ficou constatado que a solução com a discretização de uma hora (Tabela 6.3) tem um comportamento similar ao caso com discretização de meia hora. Novamente obteve-se uma vazão de alimentação igual a vazão desejada em todos os intervalos de tempo e sem nenhuma violação de restrições.

Através da Figura 6.5 pode-se notar que a amplitude da variação dos volumes armazenados nos tanques é maior do que no caso anterior, sendo possível observar alguns tanques com níveis abaixo do nível mínimo desejável, com volumes próximos a 25% da capacidade de armazenamento. Pela figura 6.6 pode ser observado com maior clareza que a maior parte dos tanques também operaram com seus volumes numa faixa entre 65 a 75% da capacidade de armazenamento, porém já apresentam valores um pouco maiores que o caso anterior.

Constatou-se também através da tabela 6.4 que os ramos 0, 5, 7 e 10 são os que apresentam a maior pressão percentual na rede. O ramo 5 registrou a maior pressão: 90%.

1h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
Total	AG	180	182	180	180	197	180	180	190	183	198	180	199	179	205	180	181	221	178	191	180	218	195	182	227
4PB	bomba	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	61	57	54	51	61	57	67	64	61	57	54	64	61	57	54	64	61	57	67	64	61	57	67	64
1PB	bomba	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1
	volume	69	73	72	70	69	67	72	70	69	73	72	70	69	73	72	70	69	67	72	70	69	73	72	70
7PB	bomba	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	volume	63	64	62	63	64	63	64	65	66	67	69	70	68	69	70	69	70	68	69	67	69	70	68	69
2CB	bomba	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1
	volume	56	47	38	30	52	43	66	57	48	40	62	53	45	36	58	50	41	63	55	46	37	60	51	42
5CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	61	58	54	51	47	44	41	37	50	46	43	39	52	48	45	41	38	50	47	43	40	37	49	45
1CB	bomba	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	57	50	42	35	28	56	48	41	34	62	54	47	40	32	60	53	46	39	31	59	52	45	37	30
4CB	bomba	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	70	69	75	74	73	71	70	68	75	73	72	70	69	75	74	72	77	75	74	73	73	71	70	71
6CB	bomba	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0
	volume	59	67	74	70	65	72	67	75	70	65	72	67	75	70	65	72	78	73	68	76	73	68	75	74
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	63	61	60	59	57	56	54	53	52	50	49	47	46	45	43	42	40	39	54	52	51	50	48	47
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	65	65	65	66	66	66	67	67	67	68	68	68	69	69	69	70	59	59	60	60	60	61	61	61
2PB	bomba	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
	volume	67	70	69	72	71	70	69	72	70	69	68	71	70	69	67	66	69	72	71	70	69	72	70	69
6PB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	62	60	58	63	65	63	61	61	60	62	60	62	60	64	61	59	65	62	62	60	65	67	65	70
1EL	bomba	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	volume	71	70	69	75	74	73	72	71	70	69	68	74	73	72	71	70	69	75	74	73	72	71	70	69
2EL	bomba	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	volume	66	67	64	65	66	67	68	69	70	67	64	65	66	67	68	69	70	67	68	69	70	67	64	65
1EC	bomba	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	70	69	75	73	71	69	75	74	72	70	69	75	73	71	69	75	74	72	70	69	75	73	71	69
8PB	bomba	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
	volume	66	68	69	71	69	67	64	66	68	69	71	69	70	68	66	68	69	71	69	67	68	70	68	69

Tabela 6.3.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora)

1h	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
total	AG	180	179	180	222	180	181	197	180	202	180	182	179	197	227	180	179	186	196	180	182	197	180	183	177
4PB	bomba	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	61	57	54	64	61	57	67	64	61	57	67	64	61	57	67	64	61	57	67	64	61	57	67	64
1PB	bomba	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	volume	69	67	72	70	69	73	72	70	69	73	72	70	69	73	72	70	69	73	72	70	69	73	72	70
7PB	bomba	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	volume	70	69	67	68	69	70	69	67	68	66	64	66	67	68	69	70	69	70	68	69	70	69	70	68
2CB	bomba	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	65	56	47	38	61	52	43	35	57	48	40	62	53	45	36	58	50	41	63	55	46	37	60	51
5CB	bomba	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	42	39	51	47	44	41	37	50	46	43	39	52	48	45	41	38	50	47	43	40	37	49	45	42
1CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	volume	58	51	43	36	29	57	50	42	35	28	56	48	41	34	62	54	47	40	32	60	53	46	39	31
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
	volume	70	68	75	75	74	72	71	70	68	74	73	71	70	72	70	69	75	73	72	70	69	75	74	72
6CB	bomba	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0
	volume	69	76	71	69	76	71	66	74	69	76	71	66	74	72	67	75	70	65	72	67	75	70	65	72
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
	volume	45	44	43	41	40	38	53	52	50	49	47	46	45	43	42	40	39	54	52	51	50	48	47	45
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	62	62	62	63	63	63	64	64	64	65	65	65	66	66	66	66	67	67	67	68	68	68	69	69
2PB	bomba	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	68	71	70	69	72	70	69	72	71	70	69	72	70	69	72	71	70	69	67	70	69	72	71	70
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	volume	68	66	63	69	66	64	66	64	67	65	63	61	63	68	66	63	63	64	62	60	62	60	59	64
1EL	bomba	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	volume	68	74	73	72	71	70	69	68	74	73	72	71	70	69	75	74	73	72	71	70	69	68	74	73
2EL	bomba	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	volume	66	67	68	69	66	67	68	65	66	67	68	69	70	67	64	65	66	67	64	65	66	67	68	65
1EC	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	68	74	72	70	69	75	73	71	69	68	74	72	70	69	67	65	71	69	68	74	72	70	69	67

1h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
crítico	Ramo	5	5	7	5	7	7	7	5	7	10	10	5	7	7	7	7	0	5	7	7	7	5	10	7
	pressão	64	66	77	90	77	77	72	66	77	85	85	64	77	77	77	72	57	66	77	77	72	66	85	77
crítico	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	Ramo	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	7	5	7	10	5	7	7	7	10	5	7	5	7	0
	pressão	77	64	77	77	66	72	77	66	73	77	72	66	77	85	66	77	72	77	85	66	77	66	73	57

Tabela 6.4: Pressão máxima na rede (intervenções a cada uma hora)

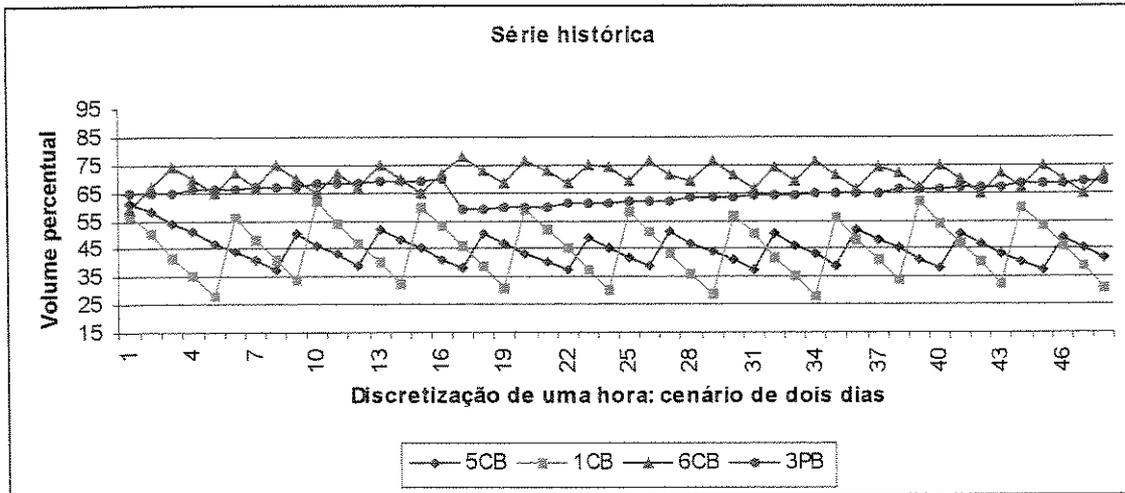


Figura 6.4: Série histórica de tanques representativos

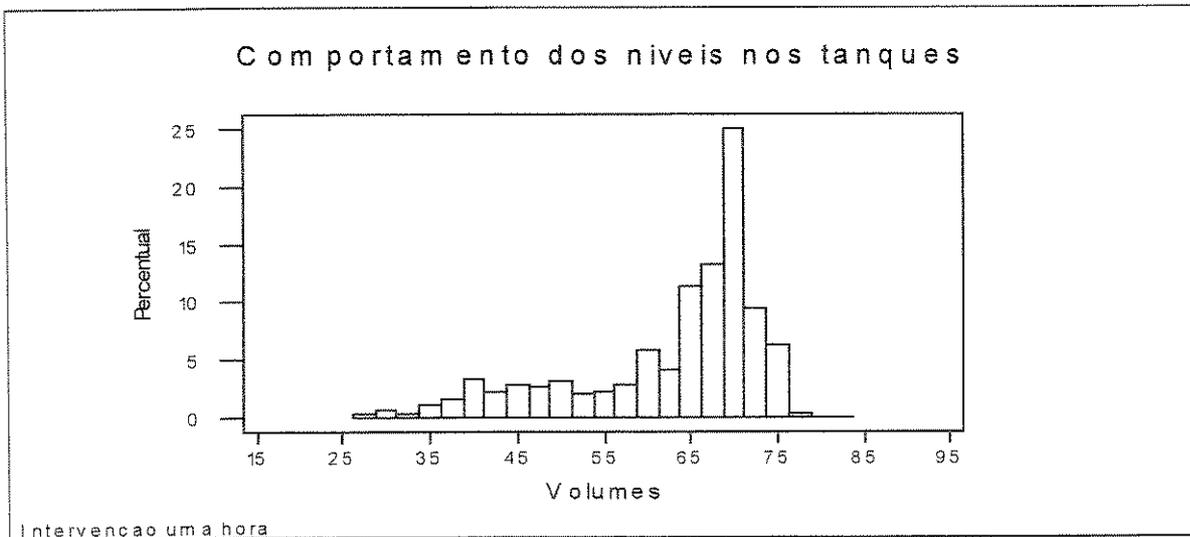


Figura 6.5: Histograma de volumes

Observou-se num cenário de 48 horas que o número médio de partidas por bomba foi igual a 10,55.

Teste 3 : Sistema completo com discretização de uma hora e meia

A solução obtida para o intervalo de discretização de uma hora e meia também atendeu a vazão média desejada e também não violou nenhuma restrição. Porém, o comportamento do volume armazenado do tanque 6CB já atingiu níveis críticos (80% de sua capacidade). Embora por um tempo relativamente baixo, é um comportamento indesejável, por questões de segurança, supondo-se uma situação de emergência.

1h 1/2	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
total	AG	180	193	187	180	180	185	180	184	196	180	196	233	195	181	194	197
4PB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	volume	59	74	69	64	59	74	69	64	59	74	69	64	59	74	69	64
1PB	bomba	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	62	69	75	73	71	69	66	73	71	69	75	73	71	69	75	73
7PB	bomba	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
	volume	62	63	65	67	64	66	68	70	67	64	66	68	70	67	64	66
2CB	bomba	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	volume	51	38	72	59	46	33	66	53	40	74	61	48	35	68	55	42
5CB	bomba	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	volume	59	54	49	44	39	57	52	47	42	37	55	50	45	40	35	53
1CB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
	volume	53	42	31	73	62	51	40	29	71	60	50	39	28	70	59	48
4CB	bomba	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	74	72	70	68	77	75	74	73	71	70	68	77	76	74	73	71
6CB	bomba	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	75	71	65	59	70	64	75	71	66	77	72	35	75	69	60	75
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	62	60	58	56	54	52	50	47	45	43	41	39	61	59	57	55
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	volume	65	65	66	66	67	67	68	68	69	69	70	54	54	55	55	56
2PB	bomba	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
	volume	62	67	72	70	68	73	71	69	74	72	70	68	73	71	69	74
6PB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	61	60	58	66	63	60	57	65	65	61	62	69	69	66	67	68
1EL	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	63	73	71	69	68	78	76	74	73	71	69	79	78	76	74	73
2EL	bomba	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
	volume	60	62	63	59	54	56	51	53	54	50	51	53	54	50	51	53
1EC	bomba	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	73	71	68	66	75	72	69	78	76	73	71	68	77	75	72	69
8PB	bomba	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
	volume	67	69	72	68	71	68	70	67	69	66	68	71	68	64	67	69

Tabela 6.5.1: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora e meia)

1h/2	instante	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
total	AC	193	222	180	181	195	183	212	178	181	181	193	180	180	208	185	209
4PB	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	volume	59	74	69	64	59	74	69	64	59	74	69	64	59	74	69	64
1PB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	volume	71	69	66	73	71	69	75	73	71	69	75	73	71	69	75	73
7PB	bomba	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	volume	68	70	67	64	66	68	70	67	69	66	68	65	67	69	66	68
2CB	bomba	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0
	volume	76	63	50	36	70	57	44	78	65	51	38	25	59	46	33	66
5CB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
	volume	48	43	38	56	51	46	41	36	54	49	44	39	57	52	47	42
1CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	37	26	68	57	46	35	24	66	55	44	33	75	64	53	42	31
4CB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	70	70	69	78	77	75	74	72	70	68	77	76	74	73	71	70
6CB	bomba	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
	volume	70	68	79	72	67	78	74	67	78	71	66	77	71	66	77	72
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	volume	53	51	48	46	44	42	40	38	36	58	56	54	52	50	47	45
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	56	57	57	58	58	59	59	60	60	61	61	62	46	46	47	47
2PB	bomba	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
	volume	72	70	68	73	71	69	74	72	70	68	73	71	69	74	72	70
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	68	75	71	68	68	65	71	67	64	60	62	58	66	71	69	75
1EL	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	volume	71	69	68	66	76	74	73	71	69	79	78	76	74	73	71	69
2EL	bomba	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	54	56	57	53	54	56	57	59	60	62	63	65	66	68	69	71
1EC	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	78	76	73	71	68	77	75	72	69	78	76	73	71	68	77	75
8PB	bomba	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
	volume	72	68	65	68	70	67	69	72	68	71	68	64	67	69	72	68

Tabela 6.5.2: Comportamento em dois dias (intervenções a cada uma hora e meia)

1h/2	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
crítico	Ramo	7	5	5	0	7	5	10	7	5	10	7	7	5	10	7	5
	pressão	77	66	66	57	77	66	85	56	66	85	77	73	66	85	77	66
crítico	instante	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	Ramo	7	7	7	5	7	7	5	7	7	7	5	7	0	5	7	7
	pressão	72	77	77	66	73	72	66	77	77	68	66	77	57	66	72	77

Tabela 6.6: Pressão máxima na rede (intervenções a cada uma hora e meia)

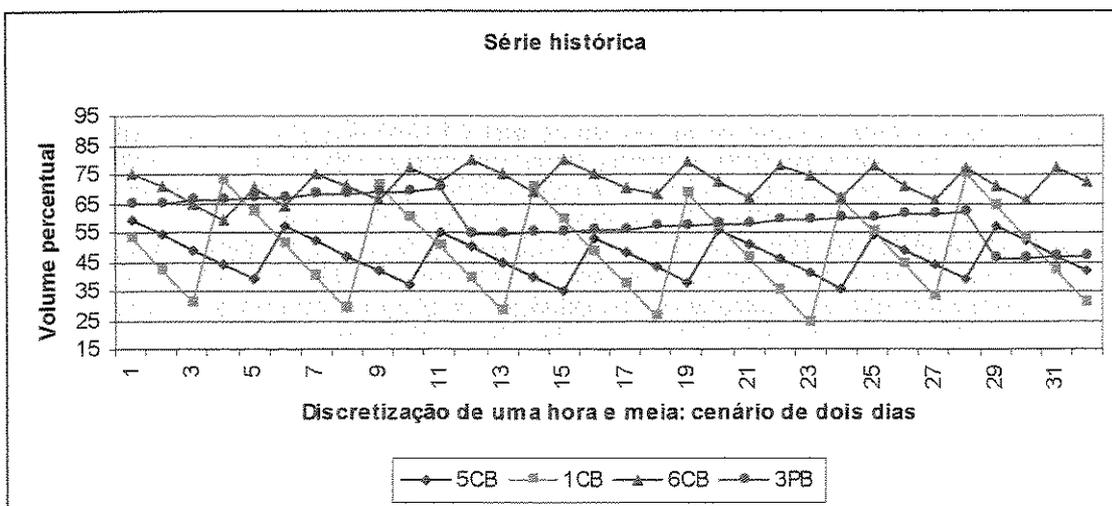


Figura 6.6: Série histórica de tanques representativos

O comportamento do nível dos tanques apresenta uma maior variabilidade, havendo tanques que alternam seus níveis de volumes altos para volumes baixos (figura 6.6).

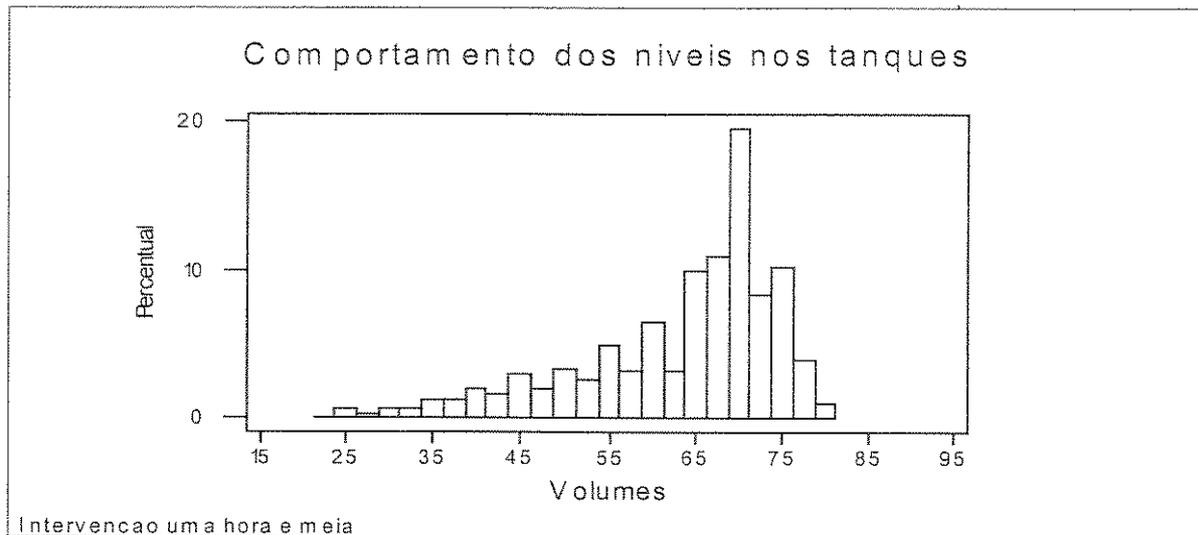


Figura 6.7: Histograma de volumes

Nota-se pelo histograma dos volumes armazenados que a intervenção no sistema de bombeamento a cada uma hora e meia trabalha com volumes máximos maiores do que os dois casos anteriores, embora a grande maioria ainda opere com níveis entre 65 e 75% (figura 6.7).

Observou-se num cenário de 48 horas que o número médio de partidas por bomba foi igual a 19,45.

Teste 4 : Sistema completo com discretização de duas horas

Finalmente, para o intervalo de discretização de duas horas também se obteve uma solução com a vazão de alimentação desejada em todos os intervalos de tempo e também sem nenhuma violação de restrições. Porém, como já se tinha observado no teste 3, esta solução resulta em volumes máximos ainda maiores que todos os casos anteriores. Por exemplo, o tanque 1CB apresentou um volume de 89% sobre sua capacidade por quatro horas dentro de um cenário de 48 horas (tabela 6.7). Este foi o maior volume ocorrido neste

teste, sendo explicável dado as características da ICB que possui alta produtividade em relação a sua capacidade nominal de armazenagem, resultando num rápido enchimento onde o tanque passa de um nível de 32% para 89% após estar desligado por duas horas o seu bombeamento.

2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão	PL	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177	177
total	AG	180	205	195	180	179	181	180	180	237	180	179	219	180	180	204	219	195	180	183	205	181	180	186	180
4PB	bomba	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	volume	57	78	71	64	57	51	71	64	57	78	71	64	57	78	71	64	57	51	71	64	57	51	71	64
1PB	bomba	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
	volume	61	70	67	64	61	58	67	64	73	70	67	76	73	70	67	76	73	70	67	76	73	70	67	76
7PB	bomba	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	volume	61	57	60	56	58	61	57	60	62	58	55	57	54	50	52	55	57	54	56	58	61	63	66	68
2CB	bomba	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0
	volume	47	30	75	57	40	85	67	50	32	77	60	42	25	70	52	35	30	62	45	27	72	55	37	22
5CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	volume	58	51	44	37	62	55	48	41	35	28	52	45	39	32	56	50	43	36	60	54	47	40	33	58
1CB	bomba	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	50	35	20	76	62	47	32	89	74	59	45	30	36	71	57	42	28	34	69	54	40	25	31	67
4CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
	volume	77	75	74	72	69	82	80	77	84	81	79	80	77	76	74	76	75	73	70	68	81	79	76	74
6CB	bomba	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
	volume	79	74	69	84	75	67	82	74	76	67	82	77	69	83	79	74	69	83	76	71	63	78	72	64
3CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	61	59	56	53	50	47	45	42	39	68	66	63	60	57	54	52	49	46	43	40	38	67	64	61
3PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	volume	65	66	66	67	68	68	69	70	48	49	50	50	51	52	52	53	54	54	55	55	56	57	57	36
2PB	bomba	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
	volume	70	68	74	72	69	67	64	62	68	74	72	69	75	73	70	68	74	72	69	75	73	70	68	74
6PB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	volume	60	64	63	58	68	63	58	68	79	74	68	77	72	66	70	79	78	73	68	72	67	62	58	68
1EL	bomba	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	62	75	73	71	69	82	80	78	75	73	71	69	82	80	78	75	73	71	69	82	80	78	75	73
2EL	bomba	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	volume	59	61	63	65	59	61	63	57	59	53	55	57	59	53	55	57	59	61	63	65	67	61	63	57
1EC	bomba	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	76	73	69	66	63	59	71	68	80	76	73	69	81	78	75	71	68	64	76	73	69	81	78	75
8PB	bomba	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
	volume	60	63	67	62	65	61	57	53	56	52	55	58	61	57	60	63	67	62	65	69	72	68	71	67

Tabela 6.7: Comportamento do modelo com intervenções a cada duas hora

Os tanques das estações de coleta 2CB, 4CB, 6CB, 1EL, 1EC também operaram com volumes altos, tendo sido registrado que na média 18,8% do tempo há algum tanque operando com volumes acima dos 80%. Tal taxa é pouco recomendável devido aos aspectos de segurança para a realização do transporte do petróleo e o controle dos tanques, mesmo não tendo ocorrido o enchimento total de nenhum dos tanques em operação.

2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
crítico	Ramo	5	7	5	7	0	7	7	0	5	5	7	7	5	10	7	7	5	7	7	5	7	7	7	0
	pressão	66	73	66	77	57	73	72	57	66	66	77	77	64	85	77	77	66	77	72	66	77	77	77	57

Tabela 6.8: Pressão máxima na rede com intervenções a cada duas horas

O comportamento das pressões na rede de dutos continuou a apresentar um resultado similar aos outros intervalos de intervenção no sistema de bombeamento (tabela 6.8),

ênfatizando que para este sistema o aspecto pressão nos dutos não demonstrou-se proibitivo. Novamente os ramos que registraram a maior pressão foram 5, 7 e 10, tendo nível de pressão mais alto ocorrido no ramo 10 com 85% de capacidade.

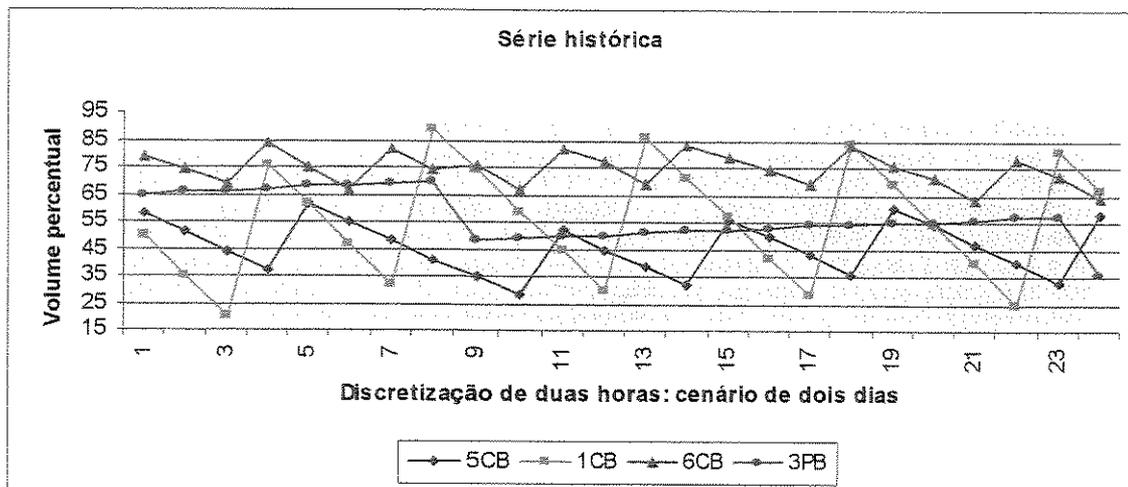


Figura 6.8 - Série histórica de tanques representativos

A figura 6.8 mostra a grande variação nos níveis dos volumes armazenados nos tanques com amplitudes ainda maiores que os casos anteriores, ocasionado pelo longo intervalo que as bombas ou ficam ligadas ou desligadas (figura 6.8). Dos dados apresentados na figura 6.9 pode-se notar que os volumes máximos são maiores do que todos os casos anteriores, embora poucos casos ultrapassem os 80%.

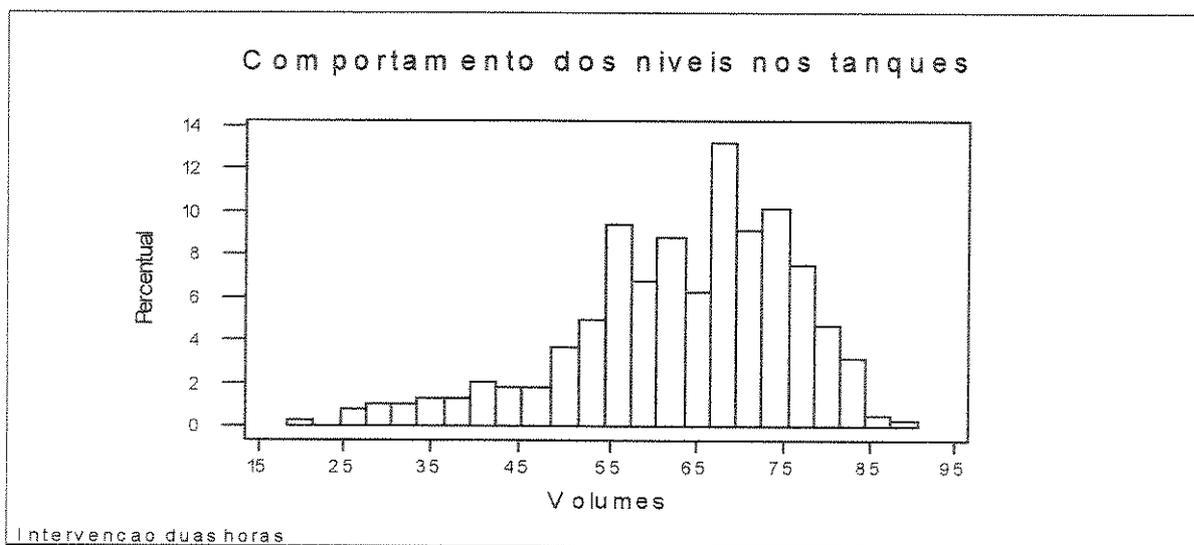


Figura 6.9: Histograma de volumes

6.3 Avaliação de estabilidade do AG implementado

O AG é uma metodologia que tem uma componente aleatória e a cada nova execução do algoritmo obtém-se uma nova solução. Para testar a estabilidade do algoritmo genético, foi analisado o comportamento do número de partidas por bomba, uma vez que todas as soluções obtiveram as vazões desejadas. A semente utilizada no gerador aleatório em cada execução foi inicializada com os valores hora, minutos e segundos obtidos do relógio onde o programa foi rodado. Com sementes distintas, observando sempre um cenário de dois dias, executou-se 5 vezes cada um dos modelos, ficando demonstrado a estabilidade de seus comportamentos.

Obtidos esses valores, fizemos a sua análise através da ferramenta estatística *boxplot* (ver figura 6.10). O *boxplot* é uma ferramenta estatística onde os dados são todos ordenados do menor valor para o maior. Esses valores são igualmente distribuídos em grupos de 25%, que denominamos quartis. Ao olhar para o primeiro quartil, a haste inferior do gráfico, é possível ter uma idéia do valor mínimo do conjunto de dados, situado na extremidade inferior desta haste, bastando fazer a interseção deste ponto com o valor no eixo y. O segundo quartil é representado pela caixa inferior do gráfico. Para localizar a mediana entre os dados em observação basta correlacionar a parte superior do 2º quartil com o eixo y. O 3º quartil, representado pela segunda caixa no gráfico, também identifica na sua parte inferior a mediana, e em sua extremidade superior o ponto correspondente a 75% dos valores ordenados. O último quartil trata-se da haste superior, registrando a existência do maior valor no conjunto de dados por sua extremidade superior. Toda vez que algum valor no conjunto de dados apresentar um comportamento muito distinto dos demais itens analisados, o gráfico apresenta um asterisco fora de uma das hastes, na extremidade que corresponda ao ponto de ocorrência deste valor. Este valor fora dos padrões é citado na literatura como um ponto de “*outlyer*” ou fora do normal.

A tabela 6.9 apresenta os dados para a discretização de meia hora. “Q1” representa o primeiro quartil e “Q3” o terceiro quartil, sendo que “Média” representa o número médio de partidas das bombas no cenário de dois dias.

Teste	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
1/2h 1	19,62	21,50	1,00	37,00	12,75	26,50
1/2h 2	19,25	20,00	1,00	36,00	12,75	27,50
1/2h 3	19,56	20,50	1,00	38,00	13,50	26,75
1/2h 4	19,31	20,50	1,00	36,00	12,00	27,00
1/2h 5	19,56	21,00	1,00	36,00	11,75	27,75

Tabela 6.9: Estatística descritiva - intervenção a cada meia hora

Neste teste o número médio de partidas ou inicialização de bombas foi de aproximadamente 19,4 e com uma variação menor do que 2%. O valor mínimo que uma das máquinas foi inicializado é sempre igual a um, sendo que o número máximo de partidas também apresenta pouca variação.

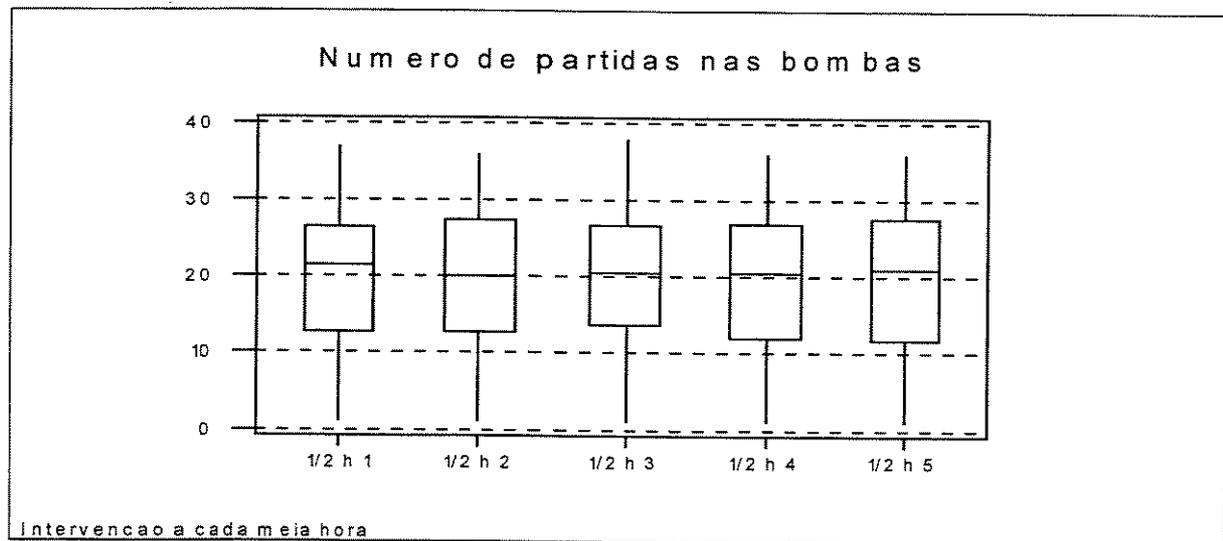


Figura 6.10: Boxplot do número de partidas de máquinas

A tabela 6.10 e a figura 6.11 mostram os resultados para a discretização de duas horas, e nota-se um comportamento similar ao caso de meia hora. De modo que para este sistema o AG demonstrou-se bastante estável. Na figura 6.11, o último *boxplot* não apresenta a haste superior pois, o valor máximo coincide com o valor do 3º quartil em relação ao eixo y (veja os respectivos valores na última linha da tabela 6.10).

Testes	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
2 h 1	5,50	6,00	2,00	8,00	3,50	7,00
2 h 2	5,37	6,00	1,00	8,00	4,00	7,00
2 h 3	5,43	6,00	1,00	8,00	3,50	7,00
2 h 4	5,62	6,00	1,00	9,00	4,00	7,00
2 h 5	5,56	6,00	2,00	7,00	4,25	7,00

Tabela 6.10: Estatística descritiva

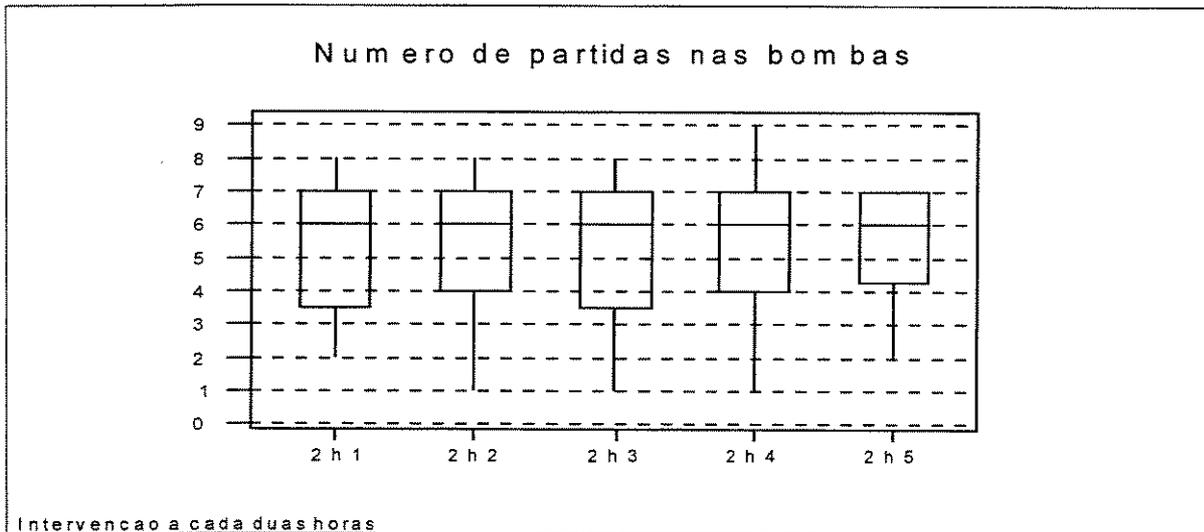


Figura 6.11: Boxplot do número de partidas de máquinas

6.4 Uma Análise Multiobjetivo

Como o objetivo principal, que era obter uma vazão de alimentação constante, foi alcançado, é necessário analisar outros aspectos para direcionar a escolha da melhor alternativa em termos do intervalo de discretização. Nesse sentido dois aspectos são importantes : o número máximo de partidas e o volume máximo dos tanques.

O número máximo de partidas de bombas é um aspecto a ser otimizado, pois quando um motor elétrico é inicializado, há um pico de demanda de energia até estabilizar-se, além de um número alto de partidas poder danificar os equipamentos. Desta maneira, o ideal seria manter um sistema de transporte onde possa ser obtido o menor número de partidas possível. Por sua vez, um modelo com baixos números de partidas requer um

menor número de intervenções no sistema de bombeamento, e conseqüentemente opera-se com volumes maiores e maior variação no volume dos tanques, o que é indesejável.

Foi adotada uma margem operativa de segurança para o volume dos tanques como sendo menor que 80% de sua capacidade nominal. O nível dos tanques quanto mais distante do seu limite superior representará um indício de maior segurança na operação do sistema de transporte de uma petroleira.

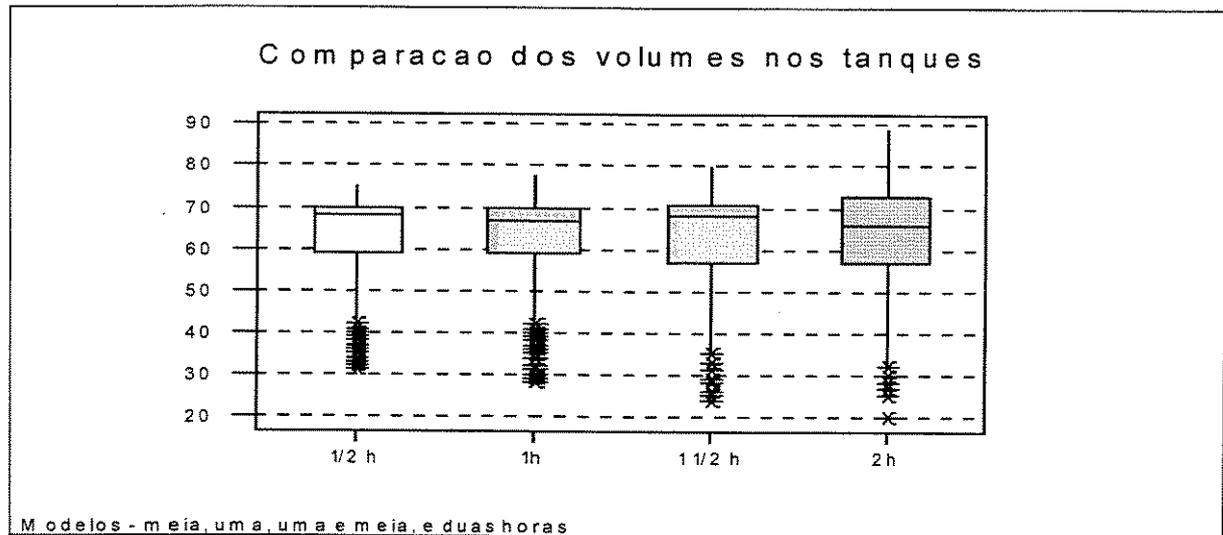


Figura 6.12: Comparação entre os quatro tempos de intervenção: volume dos tanques

Quão maior o espaço de tempo para intervir no sistema, acentua-se mais os extremos dos volumes nos tanques, tanto para os tanques que atinjam um elevado volume quanto aos que apresentem níveis abaixo (figura 6.12). Os asteriscos dos quatro casos na haste inferior do gráfico *boxplot* ocorrem devido a alguns tanques que por serem escalados muitas vezes, operam com níveis mais baixos que a média dos outros tanques.

Intervenção	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
½ h t	62,28	68,00	31,00	75,00	59,00	70,00
1 h t	62,82	67,00	28,00	78,00	59,00	70,00
1 1/2 ht	63,42	68,00	24,00	80,00	57,00	71,00
2 h t	63,43	66,00	20,00	89,00	57,00	73,00

Tabela 6.11: Estatística descritiva dos volumes

Um fato interessante e importante a destacar dos resultados apresentados na tabela 6.11 é que no volume médio (1ª coluna) há pouca variação entre a discretização de meia hora e duas horas, algo em torno 0,25%, mas os volumes mínimo e máximo (respectivamente as 4ª e 5ª colunas) apresentam uma significativa variação quando comparadas estas duas discretizações; estas variações são respectivamente da ordem de 42% e 17%. Donde pode-se concluir, mais uma vez, que o intervalo de discretização influi fortemente sobre o aspecto da segurança sobre a capacidade de armazenamento dos tanques.

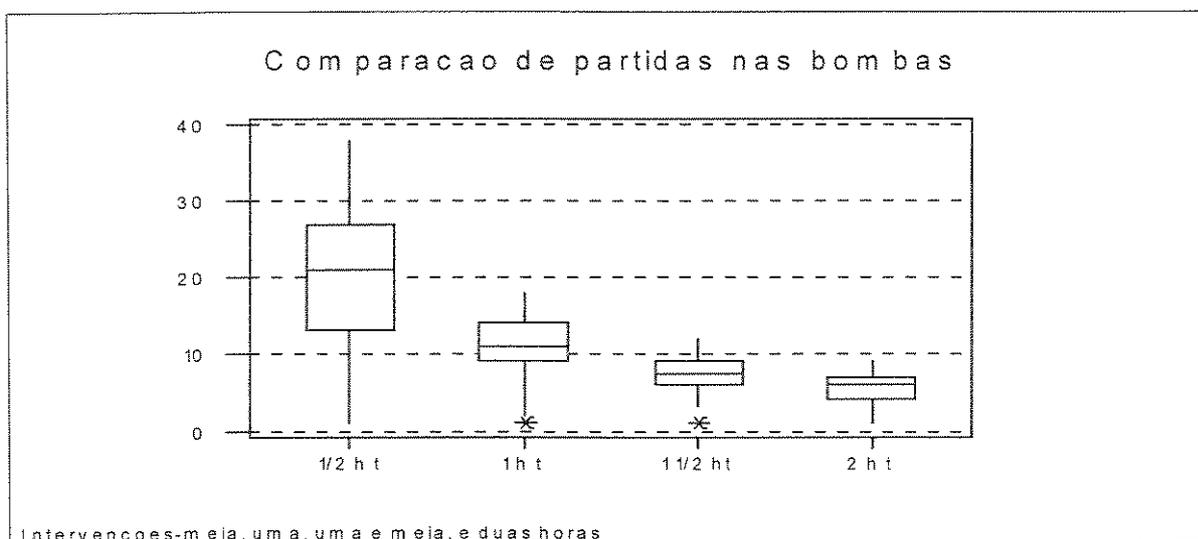


Figura 6.13: Comparação das partidas de bombas entre os quatro tempos de intervenção

O número máximo de partidas com intervenções a cada duas horas é significativamente menor em comparação com a realização de intervenções de meia hora no sistema de bombeamento (figura 6.13). Os dois asteriscos na parte inferior dos modelos uma hora e uma hora e meia deve-se a uma bomba com um tanque onde a baixa produção na estação de coleta faz com que essas duas discretizações no modelo escolha ativar esta bomba um número muito baixo de vezes, se comparado às ativações das bombas nas outras estações de captação do petróleo.

Modelos	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Q1	Q3
1/2 h t	19,46	21,00	1,00	38,00	13,25	27,00
1 h t	10,55	11,00	1,00	18,00	9,00	14,00
1 1/2 ht	7,27	7,50	1,00	12,00	6,00	9,00
2 h t	5,50	6,00	1,00	9,00	4,00	7,00

Tabela 6.12: Estatística descritiva das partidas de bombas

Comparando-se a intervenção de meia hora com a de duas horas, constata-se uma brutal diminuição de 76% do número máximo de partidas em bombas, com um acréscimo todavia de 19% no maior nível de volume armazenado entre os tanques. Embora a intervenção no sistema de envio de petróleo a cada duas horas seja ideal do ponto de vista da diminuição das partidas em bombas, notamos que há uma alta significativa nos tanques com maior produção, chegando a ser registrado níveis de 89% sobre a capacidade de armazenamento de alguns tanques.

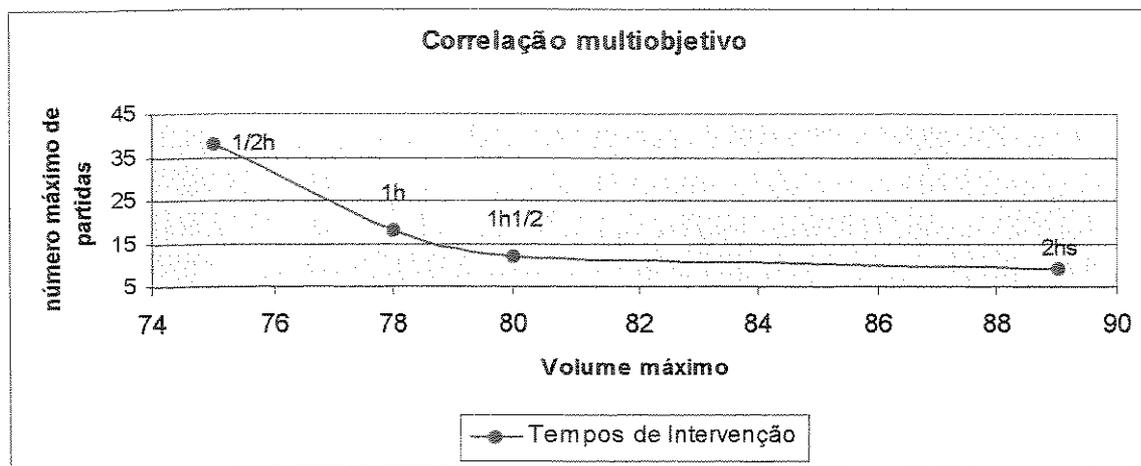


Figura 6.14: Diferentes tempos de intervenção no envio de petróleo e o volume máximo

Fazendo-se uma análise do volume dos tanques sobre a ocorrência do maior nível, num cenário de 48 horas, constata-se que se comparado a intervenção no sistema de bombeamento de meia em meia hora com a intervenção de uma hora, obtêm-se uma diminuição de 53% do número máximo de partidas em bombas (figura 6.14) com um acréscimo apenas de 3% no maior nível registrado entre os tanques. Portanto, uma diminuição significativa em que o volume máximo dos tanques opera a 78% de sua

capacidade (tabela 6.11), um nível de operação que pode ser considerado bom sob os aspectos de segurança que resultaria em economia de partidas e menor estresse aos equipamentos. O nível médio dos tanques para a intervenção a cada meia hora se comparado a intervenção de hora em hora quase não se altera, isto pode ser avaliado pelo valor do primeiro quartil e terceiro quartil dos dois casos que possuem os mesmos valores (ver respectivamente Q1 e Q3, tabela 6.11).

6.5 Contingência simples

O modelo que foi elaborado para conseguir atingir a vazão constante necessita contar sempre com as estações de coleta que possuem bombas com controle de frequência. Para conferir qual a margem de controle do sistema quando uma destas bombas estiver fora de operação foram realizados testes onde supomos cenários em que uma das três bombas com controlador está quebrada. Simulamos esta situação para cada uma das três bombas fora de operação, para as discretizações de meia hora e de duas horas num cenário de 48 horas. A seguir é mostrado nas tabelas de *contingência simples* o comportamento apenas das estações que possuem o controle sobre as suas vazões: 4CB, 6CB e 6PB.

Teste 5 : Contingência simples com discretização de meia hora

- Bomba da estação 4CB fora de funcionamento

A tabelas 6.13 mostra a solução para as bombas com controle. Como um tanque está fora de operação (4CB) diminui a produção total do campo, de modo que influi também no volume de alimentação desejado, que passou de 177 m³ a cada meia hora no caso do sistema completo para 160 m³ a cada meia hora com a bomba 4CB supostamente quebrada. Nota-se portanto que mesmo com esta bomba excluída foi possível estabilizar a vazão de alimentação ao nível desejado (2ª Linha).

Os tanques tendo sido iniciados em 65%, observa-se que o tanque 4CB começa a transbordar o petróleo do tanque operacional para os tanques de segurança a partir da 5ª

iteração, que corresponderia ao início da 2ª hora em operação. Neste cenário, porém, o controle do volume de algumas bombas (6PB) é mais crítico do que o caso com o sistema completo.

1/2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão	PL	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
total	AG	163	162	161	164	161	163	163	162	190	163	196	194	160	164	191	164	165	164	178	169	161	189	176	164
4CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	67	70	74	77	75	75	76	75	75	95	93	10	124	107	110	112	116	119	122	125	123	126	125	
6CB	bomba	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
	volume	63	60	64	63	66	70	68	72	69	73	71	69	73	70	68	71	69	73	70	68	71	69	73	70
6PB	bomba	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	67	70	68	71	70	68	71	70	72	71	74	76	75	74	76	75	74	73	74	74	72	74	75	74
crítico	Ramo	5	6	5	7	5	10	7	5	5	7	5	7	7	7	5	7	7	7	5	7	5	7	7	7
	pressão	61	32	66	56	66	85	90	66	66	77	66	77	68	77	66	77	77	72	66	73	66	72	77	77

Tabela 6.13.1: Contingência simples: 4CB

1/2h	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
vazão	PL	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
total	AG	164	168	205	162	162	175	179	162	206	169	163	192	183	163	162	164	187	166	167	171	163	182	214	162
4CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	63	64	67	65	63	66	69	65	65	65	68	72	72	72	100	65	66	69	65	66	66	65	66	67
6CB	bomba	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1
	volume	68	71	71	69	73	70	68	71	72	69	73	70	68	72	69	73	70	68	72	69	73	70	72	70
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	73	72	75	74	73	73	74	73	75	75	74	76	78	76	75	74	76	75	75	75	73	75	77	76
crítico	Ramo	5	7	7	5	10	7	5	7	5	7	5	7	7	5	7	7	5	10	7	5	10	7	5	10
	pressão	66	77	73	66	85	77	72	66	77	73	66	72	77	77	66	72	73	66	85	77	77	66	85	85

Tabela 6.13.2: Contingência simples: 4CB

1/2h	instante	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
vazão	PL	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
total	AG	163	164	199	201	163	164	207	162	183	165	168	163	194	165	163	185	176	198	163	163	167	163	165	162
4CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	217	217	220	223	226	229	232	235	238	241	244	247	250	253	256	259	262	265	268	272	275	278	281	284
6CB	bomba	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
	volume	67	71	70	69	73	70	71	68	72	69	73	71	68	72	70	67	71	69	67	64	68	72	69	73
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	75	74	77	79	78	77	80	78	80	79	78	77	80	79	78	80	80	82	82	80	80	79	78	77
crítico	Ramo	7	7	7	7	7	5	7	5	7	7	10	5	7	10	7	5	7	7	7	5	7	7	5	10
	pressão	73	72	66	77	77	66	78	66	77	72	85	66	77	85	77	66	77	77	66	68	77	66	85	85

Tabela 6.13.3: Contingência simples: 4CB

1/2h	instante	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
vazão	PL	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
total	AG	185	166	176	163	162	166	206	206	163	162	164	180	164	178	162	162	206	166	169	164	164	163	174	164
4CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	237	230	233	236	239	242	245	248	251	254	257	260	263	266	269	272	275	278	281	284	287	290	293	296
6CB	bomba	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0
	volume	71	68	72	69	73	71	71	71	68	66	70	67	71	68	72	70	70	67	71	69	72	70	67	71
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	78	77	78	77	76	75	77	80	79	78	77	78	77	77	76	75	78	77	76	75	74	73	74	73
crítico	Ramo	7	5	7	7	10	5	7	7	7	5	19	5	7	7	10	5	7	7	5	7	7	7	5	7
	pressão	72	66	77	73	85	66	77	77	77	66	106	66	77	77	85	66	77	68	66	77	77	77	66	77

Tabela 6.13.4: Contingência simples: 4CB

O tanque com defeito passa a utilizar-se do terceiro tanque de segurança a partir do instante 45, que ocorreria às 22 horas e 30 minutos após o momento em que a sua bomba ficou paralisada. Na iteração de número 78, que corresponde a 39ª hora do cenário simulado mesmo o terceiro tanque de segurança encontra-se lotado, caso a bomba não

tivesse sido concertada ainda, o que implicaria na necessidade de estarem desligados a partir deste instante todos os poços de petróleo conectados a esta estação de coleta, para não haver derramamento de petróleo.

A pressão na rede de dutos apresenta o comportamento típico, com pressões altas mas factíveis nos ramos esperados.

• **Bomba da estação 6CB fora de funcionamento**

No caso em que simulamos a estação 6CB com a sua bomba quebrada a meta estipulada para o volume passou a ser 159 m³ - 1/2 hora. O sistema de transporte respondeu bem ao atendimento da nova meta para vazão, apresentando uma variação 0 em relação ao fluxo estipulado (tabelas 6.14).

1/2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão	PL	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
total	AG	162	161	161	162	162	162	162	162	173	160	162	160	163	162	162	162	177	173	168	163	162	187	197	163
4CB	bomba	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	64	64	67	67	66	69	69	72	71	70	70	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71	71	70	70
6CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	68	72	75	79	83	87	90	94	98	101	105	109	112	116	120	124	127	131	135	138	142	146	149	153
6PB	bomba	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	67	70	68	71	70	69	71	70	71	69	72	70	69	68	71	70	71	71	70	69	72	74	77	76
crítico	Ramo	7	0	5	0	5	7	0	7	5	7	0	7	7	10	0	7	7	5	7	7	0	7	7	7
	pressão	56	57	66	57	64	77	57	73	66	77	57	77	72	85	57	73	77	66	77	77	57	72	77	77

Tabela 6.14.1: Contingência simples: 6CB

1/2h	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
vazão	PL	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
total	AG	162	169	160	161	175	166	170	162	197	160	162	176	174	171	161	162	167	162	183	162	162	162	197	161
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	70	69	72	71	71	70	69	72	72	72	71	70	70	69	68	71	70	70	69	68	71	71	71	71
6CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	157	169	164	163	172	175	179	189	186	190	184	197	201	205	209	212	216	220	225	227	231	234	238	242
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	75	77	76	74	75	74	74	73	76	74	73	74	74	74	73	72	71	70	71	70	69	72	75	73
crítico	Ramo	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	7	7	7	5	7	7	5	10	7	7	0	7	7
	pressão	66	77	68	66	77	77	72	66	77	73	66	72	77	77	66	72	73	66	85	77	77	57	77	73

Tabela 6.14.2: Contingência simples: 6CB

1/2h	instante	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
vazão	PL	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
total	AG	161	163	176	192	161	162	172	164	185	162	204	162	185	164	161	192	176	196	162	162	190	162	161	162
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	
	volume	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71	72	72	71	70	70	69	72	72	71	70	70	69	72	71
6CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	245	249	253	257	260	264	268	271	275	279	282	286	290	294	297	301	305	308	312	316	319	323	327	331
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	72	71	72	74	73	72	72	71	73	72	74	73	75	74	73	76	76	79	78	77	79	78	77	75
crítico	Ramo	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	5	7	7	7	7	5	7	7	5	7	7
	pressão	77	66	77	77	66	72	73	66	77	72	77	66	77	73	66	77	77	77	66	77	73	66	85	77

Tabela 6.14.3: Contingência simples: 6CB

1/2h	instante	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
vazão total	PL	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
	AG	179	162	197	162	162	162	188	197	162	163	167	164	162	180	168	161	176	162	190	163	177	162	162	185
4CB	bomba	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
	volume	71	70	70	69	72	72	71	71	70	70	69	72	71	71	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71
6CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	134	133	142	145	149	153	158	160	164	167	171	175	179	182	186	190	195	197	199	202	204	206	208	210
6PB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	76	75	78	77	76	75	77	79	78	77	77	76	75	76	75	74	75	74	76	75	76	75	74	75
crítico	Ramo	7	5	7	7	10	5	7	7	5	7	7	5	10	7	7	5	7	7	5	7	7	7	5	7
	pressão	77	66	77	73	85	66	72	77	66	72	73	66	85	72	77	66	77	68	66	77	77	72	66	77

Tabela 6.14.4: Contingência simples: 6CB

Na discretização de meia hora, sob a situação de contingência para a estação 6CB não foram observados níveis de tanques acima do desejado. No caso do tanque 6CB que encontra-se com a bomba paralisada, nota-se que o seu volume começa a transbordar para a 1º tanque de segurança a partir do instante 10, que corresponde a 20ª hora na simulação, atingindo o 2º tanque de segurança no instante 37 (18 horas e 30 minutos da simulação), que passa transbordar no instante 64 (32ª hora no cenário), quando seria necessário todos poços de produção pertencentes a estação com problemas estarem paralisados. As pressões no oleoduto foram sempre factíveis.

- **Bomba da estação 6PB fora de funcionamento**

Com a bomba da estação 6PB não podendo realizar o envio de petróleo, a meta estabelecida para o envio do petróleo passa a ser 156m³ - 1/2 hora. O recebimento da vazão na PPP registra-se constante para todos os instantes no cenário testado para dois dias (tabelas 6.15).

Quando a estação 6PB está com sua bomba fora de funcionamento fica registrado para o tanque 6CB a ocorrência de níveis acima de 80%, mesmo para a presente discretização.

As pressões na rede de dutos apresentaram-se da maneira esperada: pressões factíveis e com os valores maiores nos ramos de costume.

1/2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão	PL	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
total	AG	159	160	159	159	160	159	187	159	185	160	179	182	159	159	186	159	169	158	161	157	164	184	194	160
4CB	bomba	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	volume	64	64	67	70	70	70	69	72	71	71	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71	70	70	70	70
6CB	bomba	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	68	72	70	68	72	70	74	72	75	74	76	79	77	75	79	77	77	75	74	71	71	74	78	76
6PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	67	70	72	75	78	80	83	86	89	91	94	96	99	102	104	107	110	112	115	118	120	123	126	128
crítico	Ramo	7	7	0	0	7	5	0	7	0	0	7	0	0	7	0	0	0	0	7	7	0	7	0	0
	pressão	56	62	57	57	56	90	57	57	56	57	57	57	77	57	57	57	57	57	56	90	57	56	57	57

Tabela 6.15.1: Contingência simples: 6PB

1/2h	instante	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
vazão	PL	156	156	156	156	156	156	156	158	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
total	AG	159	165	178	158	172	163	159	209	194	157	159	173	171	168	158	162	187	159	172	159	159	179	194	158
4CB	bomba	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	volume	69	72	71	70	70	69	72	75	76	75	74	74	73	72	72	71	70	70	69	68	71	70	71	70
6CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	74	73	75	73	74	73	71	75	79	77	75	76	76	76	74	73	77	75	76	74	72	74	78	76
6PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	64	64	65	69	62	64	67	60	62	65	65	68	68	68	68	71	74	73	75	62	64	68	69	62
crítico	Ramo	0	0	6	0	0	0	7	0	0	7	0	0	0	7	0	0	7	0	0	7	0	0	0	7
	pressão	57	57	32	57	57	57	77	57	57	90	57	56	57	57	57	56	90	57	57	57	77	57	57	90

Tabela 6.15.2: Contingência simples: 6PB

1/2h	instante	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
vazão	PL	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
total	AG	159	159	173	189	159	177	192	157	194	160	179	159	161	156	160	166	199	193	159	159	187	159	160	158
4CB	bomba	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	70	69	72	72	71	70	71	70	71	70	69	69	72	71	70	70	71	72	71	70	70	69	68	68
6CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	74	72	73	77	75	77	81	78	82	80	83	81	79	77	75	79	82	80	79	82	80	79	77	77
6PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
crítico	Ramo	0	5	0	0	0	7	7	0	0	7	0	0	0	7	0	5	0	0	0	7	7	0	0	0
	pressão	57	56	57	57	57	56	90	57	57	56	57	57	57	57	90	57	56	57	57	57	77	90	57	57

Tabela 6.15.3: Contingência simples: 6PB

1/2h	instante	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
vazão	PL	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156
total	AG	164	159	194	159	158	159	186	189	159	160	164	159	159	177	172	158	173	159	187	160	182	159	160	175
4CB	bomba	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
	volume	71	70	71	70	69	72	72	71	71	70	69	72	72	71	70	69	72	72	71	70	70	69	72	71
6CB	bomba	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	volume	76	74	78	76	74	72	76	79	78	76	75	73	71	73	74	72	73	71	75	73	76	74	73	74
6PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	65	65	65	65	66	67	65	67	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
crítico	Ramo	7	0	0	7	0	7	0	0	0	7	7	0	0	7	0	0	0	6	0	0	0	7	0	0
	pressão	56	57	57	90	57	77	57	57	57	56	90	57	57	56	57	57	57	32	57	57	57	77	57	57

Tabela 6.15.4: Contingência simples: 6PB

O petróleo dos poços pertencentes a estação 6PB passa a ter a sua vazão desviada para o 1º tanque de segurança a partir do instante 14, correspondente a 7ª hora no cenário de 48 horas simulado. Sendo que no instante 52 esta vazão passa a ingressar no 2º tanque de segurança (26ª hora), registrando a necessidade de ser paralisada a atividade de todos os poços ligados a 6PB no instante 89, após 44 horas e 30 minutos do instante em que foi paralisado o funcionamento do transporte da 6PB.

Teste 6 : Contingência simples com discretização de duas horas

Os gráficos e tabelas a seguir apresentados demonstram que mesmo para um intervalo de discretização de 2 horas sempre foi possível obter uma vazão de alimentação estável. Quanto aos volumes máximos, os resultados confirmaram as expectativas, quais sejam de que o seu controle seria mais difícil do que os casos com discretização de meia hora. De qualquer forma estes resultados reforçam a robustez e a flexibilidade do modelo implementado.

- Bomba da estação 4CB fora de funcionamento**

2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão total	PL	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
	AG	163	163	174	164	165	163	164	164	223	163	171	198	163	163	162	165	181	163	165	164	181	161	168	163
4CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	77	79	93	113	135	137	150	162	174	186	198	211	223	235	247	259	272	284	296	308	320	332	345	357
6CB	bomba	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
	volume	57	72	67	60	75	66	81	75	89	91	75	83	75	66	81	75	70	62	77	70	65	80	73	65
6PB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	volume	75	70	68	79	76	70	66	77	87	82	79	81	76	70	65	76	77	72	69	79	84	75	71	66
crítico	Ramo	0	7	5	0	7	5	7	0	7	5	7	7	5	7	7	0	5	7	7	0	7	7	7	5
	pressão	57	73	66	57	77	66	77	57	72	66	77	77	66	77	72	57	66	72	77	57	77	85	72	66

Tabela 6.16: Contingência simples: 4CB

- Bomba da estação 6CB fora de funcionamento**

2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
vazão total	PL	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159	159
	AG	162	163	165	161	172	163	185	167	193	162	162	163	161	162	163	189	165	162	179	175	177	160	162	162
4CB	bomba	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
	volume	64	76	74	73	72	70	72	71	79	78	76	76	74	72	72	75	74	72	72	71	70	68	66	79
6CB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	volume	79	84	109	124	138	153	168	183	197	212	227	242	257	271	286	301	315	330	345	360	375	390	404	419
6PB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	volume	75	71	67	78	77	72	76	73	76	70	65	76	70	65	75	80	76	70	73	74	75	69	65	75
crítico	Ramo	0	5	5	0	7	5	7	7	7	5	7	0	5	10	7	7	5	7	7	5	7	7	10	0
	pressão	57	66	66	57	72	66	77	77	72	66	77	57	66	85	77	77	66	77	77	66	77	85	57	57

Tabela 6.17: Contingência simples: 6CB

- **Bomba da estação 6PB fora de funcionamento**

2h	instante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Vazão	PL	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	156	
Total	AG	159	159	160	160	178	158	194	157	173	159	159	163	159	159	171	191	169	159	176	172	174	157	165	159
4CB	bomba	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	volume	64	76	74	74	75	73	83	80	89	88	86	88	86	84	83	82	80	89	88	88	88	84	82	
6CB	bomba	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	volume	79	72	64	78	82	73	86	71	75	66	58	73	64	79	80	85	84	75	78	80	82	73	69	60
6PB	bomba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	volume	75	82	86	107	113	120	139	150	160	171	182	192	203	213	223	235	245	256	267	277	288	299	309	320
Crítico	Ramo	7	0	5	7	0	0	0	0	7	0	0	0	0	7	0	0	0	7	0	5	0	7	0	0
	pressão	56	57	90	77	57	57	57	57	57	57	57	57	57	56	57	57	57	57	77	57	90	57	56	57

Tabela 6.18: Contingência simples: 6PB

6.6 Estudo da variação dos parâmetros

Foi estabelecido um conjunto de parâmetros para a utilização do AG. Assim, foi observado o conjunto que melhor respeitasse as restrições do problema, mantendo razoável o atendimento e comportamento dos níveis dos tanques de forma a evitar a ocorrência de transbordamento.

- **Análise do nível dos tanques**

Foram realizados testes sobre a visualização do estado futuro dos tanques, de forma a ser analisado o comportamento dos volumes apenas em relação ao tempo futuro em operação: ou seja, no modelo de intervenção no sistema hidráulico a cada uma hora e meia, avaliar o estado futuro para as próximas uma hora e meia ao invés de duas horas. Tal análise demonstrou uma piora no comportamento do modelo, dado a uma ação muito imediatista quanto a seleção para acionar bombas.

- **Limites para ativação e desativação obrigatória de bombas**

No algoritmo genético foi introduzido um conjunto de regras para evitar que ocorresse tanques muito cheios que permanecessem desligados e em contra partida, tanques muito vazios ligados. Todavia, o estabelecimento dos parâmetros quanto aos limites ideais para ativação e desativação foi o resultado de análise e experimentação.

Limite inferior dos tanques:

Constatou-se que se estabelecidos níveis muito baixos para a desativação de uma bomba, isto resultaria na possibilidade de tanques mais cheios ficarem desativados por mais tempo. Estes tanques mais vazios eram selecionados preferencialmente pelo algoritmo genético devido a menor pressão resultante. Vários testes foram realizados e observou-se que o limite mínimo de 35% era o mais adequado.

Limite superior dos tanques:

Para o limite superior, notou-se que para valores muito baixos, resultava em um desvio grande em relação a meta de vazão de alimentação da PPP. Este desvio era sempre positivo pois, supondo que um número grande de bombas estivessem com seus tanques a, digamos 70 % de seus volumes, resultava em muitas bombas ligadas automaticamente, com uma vazão além da desejada, no caso do modelo proposto de 177 metros cúbicos para cada intervalo de tempo.

• **Regra para ativação de bombas com maior produtividade**

O trabalho de modelagem que foi realizado precisou atentar para o fato da rede contar com diferentes estações de coleta, cada uma com um índice de produtividade diária e capacidade de armazenamento própria.

Isto influenciou para que no sistema de regras de ativação automática de um tanque, em observação ao seu limite superior, a análise do volume atual e futuro de um determinado tanque, se ajustasse para que tais parâmetros de ativação fossem funcionais nos quatro testes realizados.

O estudo passou a observar que o parâmetro de ativação automática quanto ao limite superior dos tanques não resultava em um funcionamento factível, se aplicado ao modelo de intervenção a cada duas horas para as estações de coleta com uma alta produtividade, que sempre transbordavam dado sua alta velocidade de enchimento, quando estas não

havia sido selecionadas para estarem ativadas, num cenário em que no instante anterior (duas horas anteriores) contassem com um nível de 60% de sua capacidade nominal, digamos.

Desta forma, foi necessário estimular um limite superior diferenciado para as estações de coleta com baixa produtividade e das estações com alta produtividade, no tocante a regra de ativação automática. Sendo que para as estações com alta produção aplicamos o parâmetro de 65% enquanto para os tanques com média e baixa produção mantivemos os limites superiores a 75% de sua capacidade.

- **Meta de vazão para o Algoritmo Genético**

A etapa de seleção das bombas que entrarão na resolução é diretamente influenciada pelo valor da vazão estabelecido como meta para o AG. Assim, o estabelecimento de um valor demasiadamente próximo dos 177 metros cúbicos, vazão que será atendida pelo modelo linear, demonstrou muitas vezes resultados onde o comportamento da função objetivo caminhava para valores como 176 ou 175 metros cúbicos.

No caso da seleção de envio no algoritmo genético resultar em valor acima da meta no PL, o sistema obtém o atendimento da meta com a diminuição de envio junto as bombas com variadores de frequência. Entretanto, na situação contrária, onde a sua vazão é inferior ao valor desejado, resulta num estado onde a meta não pode ser atendida satisfatoriamente.

A resolução deste aspecto levou a uma modelagem onde há uma minimização do desvio em relação ao valor de vazão estabelecido para o AG, e estabelece-se como meta de envio $177 + \Delta \text{ m}^3$. Todavia, a determinação deste Δ mostrou que caso o valor fosse muito acima dos 177 m^3 pretendidos para o sistema, teríamos problemas com os tanques com variadores. Estes tanques transbordavam pois, quando o valor de envio está muito acima do desejado, o modelo protela esse excesso de vazão reduzindo demasiadamente as saídas que estejam estabelecidas para os tanques com variadores de frequência. Assim, a meta de 177 m^3 é atendida, mas a longo prazo transborda o volume destes tanques.

Ficou estabelecido como parâmetro ótimo $\Delta = 3 \text{ m}^3$. Este valor provou ser o melhor para os quatro modelos de intervenção no sistema de bombeamento pois, evitou que os

tanques com variadores de frequência transbordassem, ao mesmo tempo sempre atendendo a demanda de envio requerida para a resolução do PL em relação a demanda do sistema.

- **Tamanho de população e tempo de execução**

No sistema de transporte da petroleira, o tempo máximo para o programa retornar a melhor solução, independentemente da plataforma em que estiver rodando, será sempre:

Para $t = 1 \rightarrow 5$ minutos de execução

Para $t > 1 \rightarrow 5$ minutos + tempo para próxima intervenção no sistema de bombeamento.

Sendo este um problema dinâmico, a busca do genético foi executada n vezes para a obtenção da melhor solução para cada intervalo de tempo, ou instante de intervenção no sistema de bombeamento. Nesta busca para a seleção das bombas que entrarão na solução básica do modelo linear, foi observado que um número médio de 500 iterações era o suficiente para a obtenção do resultado ótimo aplicado a solução de determinada instância na seleção de bombas. No ambiente onde executamos o programa, tal número de iterações no genético era atingido com um tempo computacional inferior 15 segundos. Portanto, estabelecemos o tempo de busca para o genético em 15 segundos.

Após experimentações, o tamanho ideal da população estabeleceu-se como sendo um número de 100 indivíduos. Um número menor de indivíduos por população foi testado e embora proporcione ganho quanto ao esforço computacional, em algumas vezes os resultados quanto a vazão não foram satisfatórios, ficando abaixo da meta. Isto é decorrente do fato de uma população com um número de indivíduos reduzida restringir o espaço de busca.

CONCLUSÃO GERAL

1. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi investigar a utilização de Algoritmos Genéticos e Programação Linear na solução do problema de transporte de petróleo em dutos, de forma a atingir um estado contínuo em sua vazão, sob as condições dinâmicas de uma jazida de petróleo. Foram propostos quatro discretizações viáveis para as características existentes no sistema de produção da Petrolera Perez Companc, empresa que disponibilizou dados para a modelagem aplicada ao problema.

Os testes realizados com as quatro formas de intervenção, onde faziam-se intervenções no sistema de bombamento a cada meia hora, uma hora, uma hora e meia, ou duas horas, demonstrou a estabilidade do modelo que garantiu uma vazão com variação zero em relação ao valor estabelecido como ideal para o fluxo a ser recebido na PPP (Planta de Pré-processamento de Petróleo).

2. Resultados

A metodologia apresentada neste trabalho mostrou-se adequada para a aplicação presente, tanto na modelagem do problema, como também no tempo de execução para resolução do modelo. Quanto ao modelo, as principais restrições de operação dos tanques,

bombas e dutos foram satisfatoriamente consideradas, e a utilização das bombas com variadores de frequência como as variáveis de folga para se atingir a vazão de alimentação desejada foi suficiente.

Os resultados obtidos mostraram que para o exemplo tratado, a combinação do modelo de algoritmos genéticos com o modelo de programação linear possibilitou a decomposição em um subproblema de alocação de bombas e em um subproblema de operação das bombas. A princípio, outras metodologias para as resoluções dos dois subproblemas poderiam ser utilizadas, como por exemplo a utilização de regras, ou também resolver o subproblema de alocação utilizando técnicas de Busca Tabu.

A aplicação da metodologia ao sistema da Petrolera Peres Companc obteve os resultados esperados, quais sejam de uma vazão de alimentação estável e o atendimento das restrições operativas do sistema. Dos resultados obtidos na aplicação em questão, conclui-se que é importante a escolha adequada do intervalo de discretização porque este parâmetro tem grande influência sobre o controle do volume máximo armazenado; o aspecto das pressões nos dutos não se mostrou crítico pois, em todas as soluções em nenhum ponto da rede as pressões atingiram valores inactíveis – superiores a 100%.

Um outro ponto em relação às bombas com controle de frequência é de que mesmo com a eventual saída de operação de uma destas bombas, somente com as duas outras foi possível obter uma solução com vazão de alimentação estável. Embora neste contexto o comportamento dos volumes máximos armazenados seja mais crítico do que no caso do sistema completo, na prática dificilmente um equipamento fica 48 horas fora de operação, de modo que na aplicação real os volumes máximos devem ter um comportamento ainda melhor.

Finalmente, há a questão do número de partidas versus volume armazenado. Estes dois aspectos estão relacionados com o tamanho do intervalo de discretização; quanto maior o intervalo, menor é o número de partidas mas também maior é o volume máximo armazenado, e vice-versa para os intervalos de discretização menores. A decisão sobre que intervalo de discretização adotar irá depender de que aspecto é mais importante : trabalhar com os volumes armazenados mais controlados, ou minimizar o número de partidas ou ainda buscar uma solução intermediária.

3. Análise econômica

Através da execução do modelo apresentado foi possível acompanhar o comportamento da malha de dutos e identificar os pontos onde apresentam-se as sobrecargas no sistema de transporte. Tais simulações permitiram identificar igualmente quais os principais tanques onde ocorrem sobrecarga de estoques dado suas altas taxas de produção. Assim, todos esses dados podem ser utilizados para análise econômica quanto a uma alocação de recursos mais racional, na hipótese de haver alguma disposição por parte da empresa em projetar futuras expansões na capacidade operativa do sistema de produção da petroleira.

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Bazaraa, M. S., Jarvis, J.J., Sherali, H. D.**, *“Linear Programming and Network Flows”*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [2] **Bobok, E., Udvardi, G.**, *“Heavy Oil Transport Through Lubricated Pipeline”*, U. of Miskolc, Society of Petroleum Engineers Paper, 1996.
- [3] **Campbell, J. M.**, *“Gas conditioning and Processing”*, Volume two, Published by Campbell Petroleum Series, 1994.
- [4] **CPLEX Optimization, Inc.**, *“Using the CPLEX Callable Library”*, version 3.0, 1989-1994.
- [5] **Dantzig, G.B.**, *“Linear Programming and Extensions”*, Princeton University Press, New Jersey, 1963.
- [6] **Dobgenski, J.**, *“Programação Linear para Aproximação de Funções aplicada ao Projeto de Filtros Digitais”*, Densis-FEEC-Unicamp, Tese de Mestrado, Campinas 1997.
- [7] **Fang, S. C., Puthenpura, S.**, *“Linear Optimization and Extensions: Theory and Algorithms”*, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [8] **Flaniga, O.**, *“Constrained Derivatives in Natural Gas Pipeline System optimization”*, Arkansas Louisiana Gas Co, Society of Petroleum Engineers Paper, 1972.

- [9] **Goldberg, D. E.**, “*Computer-Aided gas pipeline operation using genetic algorithms and rule learning*”, University of Alabama, Society of Petroleum Engineers Paper, 1985.
- [10] **Goldberb, D.E.**, “*Genetic Algorithms in Search, Otimization and Machine Learning*”, Addison-Wesley, Reading MA, 1989.
- [11] **Holland, J.H.**, “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, University of michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [12] **Ishii, M., Mi, Y., Tsoukalas, L.H., Kim, S.**, “*New objective approaches for characterization of interfacial structures in two-phase flow*”, Proceedings of the ASME Heat Transfer Division vol. 5 1998.
- [13] **Luenberger, D.**, “*Linear and Nonlinear Programming*”, Addison-Wesley, New York, 1984.
- [14] **Manning, F. S., Thompson, R. E.**, “*Oilfield Processing, Volume Two: Crude Oil*”, PennWell Books, 1993.
- [15] **Martínez, M.**, “*Cálculo de tuberías y Redes*”, Editorial de la Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 1993.
- [16] **McCabe, W. L., Smith, C. J., Harriott, P.**, “*Operaciones Básicas de Ingeniería Química*”, Madri, 1991.
- [17] **Michalewicz, Z.**, “*Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*”, Springer-Verlag, New York, 1996.
- [18] **Pitts, D. R., Sissom, L.**, “*Fenômenos de Transporte*”, Ed. McGraw Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1988.

- [19] **Reis, L.F.R., Porto, R.M., Chaudhry, F.H.**, “*Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm*”, USP, Journal of water resources planning and management, 1997.
- [20] **Rocha, A. F., Morooka, C. K., Alegre, L.**, “*Intelligent diagnosis of rod pumping problems*”, Unicamp Petrobras, Society of Petroleum Engineers Paper, 1993.
- [21] **Rocha, A. F., Morooka, C. K., Alegre, L.**, “*Smart oil recovery*”, Unicamp Petrobras, IEEE Spectrum July, 1996.
- [22] **Sant’Ana, C.C., Correia, P. B.**, “*Otimização do transporte de gás natural usando um modelo de programação dinâmica*”, XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, 1996.
- [23] **Silva, A.C., Fernandes, J.F.R., Ohishi, T., Mendes, A.S., França, F.A., Delgado E.A.R.**, “*Intelligent Control of Transport in a Pipeline Network by Genetic Algorithm and Simplex Method*”, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – Cobem’99, Águas de Lindóia, Brasil 1999.
- [24] **Silva, A.C., Fernandes, J.F.R., Ohishi, T., Mendes, A.S., França, F.A., Delgado E.A.R.**, “*Using Genetic Algorithm and Simplex Method to stabilize an oil treatment plant inlet flow*”, III International Seminar Exploration and Exploitation of Petroleum and GAS – Ingepet’99, Lima, Peru 1999.
- [25] **Streeter, V. L., Wylie, B.**, “*Fluid Mechanics*”, McGraw-Hill, Michigan, 1996.
- [26] **Stroustrup, B.**, “*The C++ programming language*”, Addison-Wesley, 1997.

[27] Sun, C., Chan, C. W., Tontwiachwuthikul, Paitoon, “*A fuzzy expert system for optimizing pipeline operation*”, Canadian Conf. On Electrical and Computer Engineering, v. 2, p. 777-780, 1997.

[28] Taylor, T.D., Wood, N. E., Powers, J. E., “*A computer simulation of gas flow in long Pipelines*”, U. Oklahoma, Society of Petroleum Engineers Paper, 1962.

[29] Teixeira, E. M. A., “*Programação horária de Peças em uma célula flexível de manufatura*”, Campinas, FEE, Unicamp, 1993.

[30] Voss, S., “*Meta-Heuristics : Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*”, Meta-Heuristics International Conference, Kluwer Academic Pub, 1998.

[31] Weiss, M. A., “*Efficient C programming : a practical approach*”, Englewood Cliffs : Prentice-Hall, c1995.

Apêndice A

IMPLEMENTAÇÃO DA ROTINA DE EXECUÇÃO DINÂMICA DO PACOTE CPLEX

A.1 Introdução

As rotinas descritas na sequência realizam o trabalho de ligação entre o programa principal de otimização do transporte de petróleo em dutos com o pacote de programação linear Cplex. O problema otimizado apresentava características dinâmicas, ou seja, o resultado da resolução no instante t influenciava no resultado do instante $t+1$, e assim sucessivamente.

O programa utilizando algoritmos genéticos após verificar quais foram as bombas selecionadas para estarem ligadas, realiza na rotina *OUTPL* a saída formatada do problema linear resultante. Assim, o arquivo gerado em *OUTPL* (denominado *form“t”.lp*), será utilizado pelo Cplex.

Na sequência o programa executa a rotina *Chama_Cplex* que escreve o arquivo *form.com*, utilizado pelo Cplex para ler os comandos determinando as instruções para a resolução do problema linear; O problema a ser resolvido pelo pacote Cplex, escrito anteriormente no arquivo *form“t”.lp*, é executado tendo os resultados direcionados para o arquivo de saída *form“t”.doc*.

Finalmente é mostrada a rotina *Ler_resultado_Cplex*, onde foi elaborado um código que leia os resultados obtidos da execução do Cplex, encontrados no arquivo *form“t”.doc*, de forma que é necessário apenas informar o número de bombas que estão escaladas para

aquela solução, lembrando que em cada instância as bombas e o número de bombas selecionadas também mudam. Ou seja, mesmo o arquivo de saída apresentando diferentes formatações para distintas variáveis, indiferentemente de quais variáveis apresentarão qual formatação de saída (ver item A.5), a rotina realiza a leitura do valor atribuído a cada envio.

A.2 Código fonte

O programa abaixo apresenta as rotinas necessárias para uma execução dinâmica, ligando o Cplex com um programa C. O código apresentado está escrito da maneira mais documentada possível, com comentários a cada passo de maneira a ser de fácil entendimento para um programador C com certa experiência. Cabe o comentário que na rotina OUTPL, onde está escrito “itoa” é implementado o procedimento para conversão de um valor número para caracter, com a intenção de poder denominar os arquivos de formulação do problema e leitura dos resultados a serem utilizados pelo Cplex, conforme o instante correspondente ao cenário da simulação dinamicamente. No ambiente *Unix* a rotina “itoa” não faz parte da biblioteca dos compiladores C e C++.

```

/*=====*/
// Last modification : 28/02/99 (domingo)
// Autor: Adriano Cavalcanti da Silva
/*=====*/
void CPLEX(int qtdde_bat,int num_problema);

void OUTPL(int qtdde_bat,int num_problema);
int OUTPL_Goal(int seq_out,int nenhuma);
void Chama_Cplex(int num_problema,int qtdde_bat);
void Ler_resultado_Cplex(int num_problema,int qtdde_bat);

FILE *outPut;
/*=====*/
void CPLEX(int qtdde_bat,int num_problema)
{
    OUTPL(qtdde_bat,num_problema);

    Chama_Cplex(num_problema,qtdde_bat);

    Ler_resultado_Cplex(num_problema,qtdde_bat);
}
/*=====*/

```

```

void OUTPL(int qtde_bat,int n)
{
    int t,seq_out,linha,posicao,nenhuma,pare;
    int vetor_Bat_variadores[3];
    int metaPL;

    metaPL=(int)METAPL;

//-----/
//----- itoa(var,probl,2) -----/
    char probl[5];
    char nomearq[10]="form";
    char extensao[4]=".lp";

    sprintf(probl,"%d",n);
    strcat(nomearq,probl);
    strcat(nomearq,extensao);
//-----/
//-----/
    outPut=fopen(nomearq,"w");

    vetor_Bat_variadores[0]=6;
    vetor_Bat_variadores[1]=7;
    vetor_Bat_variadores[2]=11;

    nenhuma=1;

    ##### entrou em OUTPL #####//

//----- funcao objetivo -----//

    fprintf(outPut,"\\Problem name: PROBL%d.lp \\n\\n",n);
    fprintf(outPut,"Maximize\\n      ");

    for(t=1; t<=4; t++)
    {
        fprintf(outPut,"- 10 y1_%d - 10 y2_%d ",t,t);
    }
    fprintf(outPut," \\n");

    for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
    {
        for(t=1;t<=4;t++)
        { fprintf(outPut," + x%d_%d",sequencia[seq_out],t);
        }

        if(sequencia[seq_out]!=6&&sequencia[seq_out]!=7&&sequencia[seq_out]!=11)
        { //nao forem baterias com variadores
//----- trabalho de + ou - na fç obj. -----/

            nenhuma= OUTPL_Goal(seq_out,nenhuma);

//----- fim do trabalho de + ou - na fç obj. -----/

        }
        else//forem baterias com variadores
        { if(pbat[sequencia[seq_out]].escalada)//caso esteja escalado
            { for(t=1;t<=4;t++)
                { fprintf(outPut," - 5 v%d_%d",sequencia[seq_out],t);
                }
            }
        }
        fprintf(outPut,"\\n");
    }
}

```

```

        }
    }

}

//----- fim da fc objetivo -----/

fprintf(outPut,"Subject To \n");
linha=1;
//----- Desvio em rel. a media -----/

for(t=1;t<=4;t++)
{
    fprintf(outPut," c%d: y1_%d - y2_%d",linha++,t,t);
    for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
    {
        fprintf(outPut," + x%d_%d",sequencia[seq_out],t);
    }

    if(t<=TIPO)
    { fprintf(outPut," = %d \n",metaPL);
    }
    else
    { fprintf(outPut," = 0 \n");
    }
}

//----- fim: desvio em relacao a media -----/

//----- limitante Volume: estoque -----/
for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
{
    t=1;
    fprintf(outPut," c%d: v%d_%d + x%d_%d = %d\n",linha++,
sequencia[seq_out],
        t,sequencia[seq_out],t,
        pbat[sequencia[seq_out]].input+pbat[sequencia[seq_out]]
        .vol);

    for(t=2;t<=4;t++)
    {
        fprintf(outPut," c%d: v%d_%d + x%d_%d - v%d_%d <= %d\n",linha++,
sequencia[seq_out],t,sequencia[seq_out],t,sequencia[seq
_out],
        t-1,pbat[sequencia[seq_out]].input);
    }
}

//----- discrimina o input -----/
for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
{
    fprintf(outPut," c%d: input_%d = %d\n",linha++,sequencia[seq_out],
        pbat[sequencia[seq_out]].input);
}

//----- Discrimina o Total que Cplex determinou na outPut p/Bat -----
-----/

```

```

for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
{
    fprintf(outPut," c%d: - x%d_Total",linha++,sequencia[seq_out]);

    for(t=1;t<=4;t++)
    {
        fprintf(outPut," + x%d_%d",sequencia[seq_out],t);
    }
    fprintf(outPut," = 0 \n");
}

//----- meta das baterias -----/
for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
{
    if(sequencia[seq_out]!=6 && sequencia[seq_out]!=7 &&
sequencia[seq_out]!=11)
    {
        fprintf(outPut," c%d: x%d_Total = %d\n",linha++,sequencia[seq_out],
                pbat[sequencia[seq_out]].meta);
    }
    else
    {
        fprintf(outPut," c%d: x%d_Total <= %d \n",linha++,sequencia[seq_out],
                pbat[sequencia[seq_out]].meta);
    }
}

//----- meta das baterias -----/

//----- limitante vazao -----/
fprintf(outPut,"Bounds\n");
for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
{
    for(t=1;t<=4;t++)
    {
        fprintf(outPut," x%d_%d <= %d\n",sequencia[seq_out],t,
                pbat[sequencia[seq_out]].output);
    }
}

//-----/
fprintf(outPut,"End\n");
fclose(outPut);

puts("===== executou system =====");
}
/*=====*/
void Chama_Cplex(int num_problema,int qtde_bat)
{
    FILE *arq;

    int vetor_Bat_variadores[3],seq_out,t,posicao,i,pare;

    printf("\t ChamaCplex :: qtde_bat %d\n ",qtde_bat);

    vetor_Bat_variadores[0]=6;
    vetor_Bat_variadores[1]=7;
    vetor_Bat_variadores[2]=11;

```

```

arq=fopen("form.com","w");
printf("\t\t num_problema =%d ",num_problema);
fprintf(arq,"read form%d.lp\noptimize\n",num_problema); //comando do Cplex read
//----- direciona arquivo de outPut -----/
fprintf(arq,"set\nlogfile\nform%d.doc\n",num_problema);
//----- Relacao das baterias na resolucao p/ "dis sol " -----/
//----- Envio de fluxo das baterias em cada um dos instantes "t"-----/

    for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
    {
        for(t=1;t<=4;t++)
        {
            fprintf(arq,"display solution\n x%d_%d\n",sequencia[seq_out],t);
        }
    }

//----- Total enviado de cada baterias na solucao -----/
    for(seq_out=0;seq_out<qtde_bat;seq_out++)
    {
        puts("++++");
        fprintf(arq,"display solution\n x%d_Total\n",sequencia[seq_out]);
        seq_bat_Cplex[seq_out]=sequencia[seq_out];
        printf("seq_bat_Cplex[seq_out] = %d\n",seq_bat_Cplex[seq_out]);
    }

//----- Fim da relacao das baterias na resolucao p/ "dis sol " -----/
/

fprintf(arq,"\nquit\n");

fclose(arq); // fim da escrita no arquivo form.com
            // necessario para a execucao do cplex

//manda executar o Cplex conforme especificacoes no arquivo form.com
system("cplex < form.com");
//-----/
}

/*=====*/
void Ler_resultado_Cplex(int num_problema,int qtde_bat)
{
    FILE *arq2;
    char *aux1,aux2[7],buffer[50],nome_solucao[20],var[200];
    int i,pare,conta,conta_var,step,seq_out,fluxo,conta_y;

    char S2[50]="The";

//atribui em nome_solucao o nome arquivo
sprintf(nome_solucao,"form%d.doc", num_problema);
arq2= fopen(nome_solucao,"r");

    conta=1;
    conta_y=0;
    while(conta<=5)
    {
        if(!strcmp(buffer,"\n"))

```

```

    {conta++;
    }
    fgets(buffer,200,arq2);
    sscanf(buffer,"%s", &var); //descarta lixo --> linhas
    printf("%s\n",buffer);

    conta++;
}
/*-----*/
seq_out=0;
conta_var=0;
step=0;
while(!feof(arq2))
{
    if(!strcmp(buffer,"\n"))
    {
        fgets(buffer,200,arq2);
        sscanf(buffer,"%s", &var); //escreve a linha na string var
        aux1=&var[0];
        conta=0;
    }
    //-----/

    if(strstr(buffer,S2))
    { // verifica se deve pular linha
        // (THE) indica que o fluxo na variavel foi igual a zero
        fluxo=0;
        //-----/
        fgets(buffer,200,arq2); //pula linha em branco
        sscanf(buffer,"%s", &var); //escreve a linha na string var
        aux1=&var[0];
        //-----/
    }
    else
    {
        if(!strchr(buffer,'x'))
        {
            fgets(buffer,200,arq2); //le para proxima linha
            sscanf(buffer,"%s", &var); //escreve a linha na string var
            aux1=&var[0];
        }
        //-----/
        aux1=&buffer[0];
        aux1+=strlen(buffer);
        for(i=0;i<11;i++)
        {
            aux1--;
        }
        for(i=0;i<3;i++)
        {
            aux2[i]=*aux1; aux1++;
        }

        // Valor da variavel convertida de caracter para inteiro
        fluxo=atoi(aux2);
        //-----/

        fgets(buffer,200,arq2); //pula linha em branco
        sscanf(buffer,"%s", &var); //escreve a linha na string var
        aux1=&var[0];
        //-----/
    }
}

```

```

//-----/

//leio os valores de x_t e x_total

//-----/
    if(conta_var++<4*qtde_bat)
    { //pega variaveis de xq_t
      // atribuo a vazao da bomba q no intante t em m3
      pbat[seq_bat_Cplex[seq_out]].x_t[step]= fluxo;

      step++;

      if(step>3)
      { //atualiza seq_out apos 4 iteracoes --> eh nova bomba
        step=0;
        seq_out++;
      }
    }
    else
    { //pega variaveis de xq_Total
      //atualiza seq_out a cada iteracao --> eh nova bateria
      pbat[seq_bat_Cplex[seq_out]].xTotal=fluxo;
      seq_out++;
    }
//-----/
    if(conta_var==4*qtde_bat)
    {seq_out=0;
    }
}
fclose(arq2);
}
/*=====*/
/*=====*/
int OUTPL_Goal(int seq_out,int nenhuma)
{
    int t;

    if(pbat[sequencia[seq_out]].vezes>=4)
    { //-----/
      for(t=1;t<=4;t++)
      { fprintf(outPut," - 100 v%d_%d",sequencia[seq_out],t);
      }
      fprintf(outPut,"\n");
      //-----/
    }
    else
    { //-----/
      for(t=1;t<=4;t++)
      { fprintf(outPut," - 100 v%d_%d",sequencia[seq_out],t);
      }
      fprintf(outPut,"\n");
      //-----/
      if(nenhuma)
      { nenhuma=0;
      }
      else
      {
        nenhuma=1;
      }
    }
}

return(nenhuma);
}

```

/*=====*/

A.3 Arquivo form.com

Arquivo salvo sempre com o nome form.com, denominação necessária para que o pacote Cplex entenda que se trata do arquivo com o conjunto de comandos a serem executados. Apresenta o conteúdo escrito pela rotina *Chama_Cplex*.

```
read form1.lp
optimize
set
logfile
form1.doc
display solution
  x0_1
display solution
  x0_2
display solution
  x0_3
display solution
  x0_4
display solution
  x3_1
display solution
  x3_2
display solution
  x3_3
display solution
  x3_4
display solution
  x4_1
display solution
  x4_2
display solution
  x4_3
display solution
  x4_4
display solution
  x5_1
display solution
  x5_2
display solution
  x5_3
display solution
  x5_4
display solution
  x6_1
display solution
  x6_2
display solution
  x6_3
display solution
  x6_4
```

```
display solution
  x8_1
display solution
  x8_2
display solution
  x8_3
display solution
  x8_4
display solution
  x11_1
display solution
  x11_2
display solution
  x11_3
display solution
  x11_4
display solution
  x12_1
display solution
  x12_2
display solution
  x12_3
display solution
  x12_4
display solution
  x15_1
display solution
  x15_2
display solution
  x15_3
display solution
  x15_4
display solution
  x0_Total
display solution
  x3_Total
display solution
  x4_Total
display solution
  x5_Total
display solution
  x6_Total
display solution
  x8_Total
display solution
  x11_Total
display solution
  x12_Total
display solution
  x15_Total

quit
```

A.4 Arquivo formatado em programação linear

Salvo com o nome `probl1.lp`, variando o número conforme o instante da resolução, ou seja, no instante 23 o arquivo apresenta a denominação `probl23.lp`. Conteúdo escrito pela rotina **OUTPL**.

```
\Problem name: PROBL1.lp

Maximize
- 10 y1_1 - 10 y2_1 - 10 y1_2 - 10 y2_2 - 10 y1_3 - 10 y2_3 - 10 y1_4 - 10
y2_4
+ x0_1 + x0_2 + x0_3 + x0_4 - 100 v0_1 - 100 v0_2 - 100 v0_3 - 100 v0_4
+ x3_1 + x3_2 + x3_3 + x3_4 - 100 v3_1 - 100 v3_2 - 100 v3_3 - 100 v3_4
+ x4_1 + x4_2 + x4_3 + x4_4 - 100 v4_1 - 100 v4_2 - 100 v4_3 - 100 v4_4
+ x5_1 + x5_2 + x5_3 + x5_4 - 100 v5_1 - 100 v5_2 - 100 v5_3 - 100 v5_4
+ x6_1 + x6_2 + x6_3 + x6_4 - 5 v6_1 - 5 v6_2 - 5 v6_3 - 5 v6_4
+ x8_1 + x8_2 + x8_3 + x8_4 - 100 v8_1 - 100 v8_2 - 100 v8_3 - 100 v8_4
+ x11_1 + x11_2 + x11_3 + x11_4 - 5 v11_1 - 5 v11_2 - 5 v11_3 - 5 v11_4
+ x12_1 + x12_2 + x12_3 + x12_4 - 100 v12_1 - 100 v12_2 - 100 v12_3 - 100 v12_4
+ x15_1 + x15_2 + x15_3 + x15_4 - 100 v15_1 - 100 v15_2 - 100 v15_3 - 100 v15_4
Subject To
c1: y1_1 - y2_1 + x0_1 + x3_1 + x4_1 + x5_1 + x6_1 + x8_1 + x11_1 + x12_1 +
x15_1 = 177
c2: y1_2 - y2_2 + x0_2 + x3_2 + x4_2 + x5_2 + x6_2 + x8_2 + x11_2 + x12_2 +
x15_2 = 177
c3: y1_3 - y2_3 + x0_3 + x3_3 + x4_3 + x5_3 + x6_3 + x8_3 + x11_3 + x12_3 +
x15_3 = 0
c4: y1_4 - y2_4 + x0_4 + x3_4 + x4_4 + x5_4 + x6_4 + x8_4 + x11_4 + x12_4 +
x15_4 = 0
c5: v0_1 + x0_1 = 124
c6: v0_2 + x0_2 - v0_1 <= 9
c7: v0_3 + x0_3 - v0_2 <= 9
c8: v0_4 + x0_4 - v0_3 <= 9
c9: v3_1 + x3_1 = 122
c10: v3_2 + x3_2 - v3_1 <= 18
c11: v3_3 + x3_3 - v3_2 <= 18
c12: v3_4 + x3_4 - v3_3 <= 18
c13: v4_1 + x4_1 = 209
c14: v4_2 + x4_2 - v4_1 <= 18
c15: v4_3 + x4_3 - v4_2 <= 18
c16: v4_4 + x4_4 - v4_3 <= 18
c17: v5_1 + x5_1 = 129
c18: v5_2 + x5_2 - v5_1 <= 23
c19: v5_3 + x5_3 - v5_2 <= 23
c20: v5_4 + x5_4 - v5_3 <= 23
c21: v6_1 + x6_1 = 379
c22: v6_2 + x6_2 - v6_1 <= 17
c23: v6_3 + x6_3 - v6_2 <= 17
c24: v6_4 + x6_4 - v6_3 <= 17
c25: v8_1 + x8_1 = 206
c26: v8_2 + x8_2 - v8_1 <= 21
c27: v8_3 + x8_3 - v8_2 <= 21
c28: v8_4 + x8_4 - v8_3 <= 21
c29: v11_1 + x11_1 = 533
```

```

c30: v11_2 + x11_2 - v11_1 <= 21
c31: v11_3 + x11_3 - v11_2 <= 21
c32: v11_4 + x11_4 - v11_3 <= 21
c33: v12_1 + x12_1 = 122
c34: v12_2 + x12_2 - v12_1 <= 6
c35: v12_3 + x12_3 - v12_2 <= 6
c36: v12_4 + x12_4 - v12_3 <= 6
c37: v15_1 + x15_1 = 249
c38: v15_2 + x15_2 - v15_1 <= 3
c39: v15_3 + x15_3 - v15_2 <= 3
c40: v15_4 + x15_4 - v15_3 <= 3
c41: input_0 = 9
c42: input_3 = 18
c43: input_4 = 18
c44: input_5 = 23
c45: input_6 = 17
c46: input_8 = 21
c47: input_11 = 21
c48: input_12 = 6
c49: input_15 = 3
c50: - x0_Total + x0_1 + x0_2 + x0_3 + x0_4 = 0
c51: - x3_Total + x3_1 + x3_2 + x3_3 + x3_4 = 0
c52: - x4_Total + x4_1 + x4_2 + x4_3 + x4_4 = 0
c53: - x5_Total + x5_1 + x5_2 + x5_3 + x5_4 = 0
c54: - x6_Total + x6_1 + x6_2 + x6_3 + x6_4 = 0
c55: - x8_Total + x8_1 + x8_2 + x8_3 + x8_4 = 0
c56: - x11_Total + x11_1 + x11_2 + x11_3 + x11_4 = 0
c57: - x12_Total + x12_1 + x12_2 + x12_3 + x12_4 = 0
c58: - x15_Total + x15_1 + x15_2 + x15_3 + x15_4 = 0
c59: x0_Total = 24
c60: x3_Total = 50
c61: x4_Total = 46
c62: x5_Total = 58
c63: x6_Total <= 42
c64: x8_Total = 46
c65: x11_Total <= 66
c66: x12_Total = 14
c67: x15_Total = 14
Bounds
x0_1 <= 12
x0_2 <= 12
x0_3 <= 12
x0_4 <= 12
x3_1 <= 25
x3_2 <= 25
x3_3 <= 25
x3_4 <= 25
x4_1 <= 23
x4_2 <= 23
x4_3 <= 23
x4_4 <= 23
x5_1 <= 29
x5_2 <= 29
x5_3 <= 29
x5_4 <= 29
x6_1 <= 21
x6_2 <= 21
x6_3 <= 21
x6_4 <= 21
x8_1 <= 23
x8_2 <= 23
x8_3 <= 23
x8_4 <= 23

```

```

x11_1 <= 33
x11_2 <= 33
x11_3 <= 33
x11_4 <= 33
x12_1 <= 7
x12_2 <= 7
x12_3 <= 7
x12_4 <= 7
x15_1 <= 7
x15_2 <= 7
x15_3 <= 7
x15_4 <= 7
End

```

A.5 Arquivo com resultados

Arquivo salvo com o nome form1.doc, também variando conforme o número do cenário simulado seqüencialmente. Supondo o instante 7, o arquivo será denominado form7.doc. Conteúdo lido pela rotina *Ler_resultado_Cplex*.

Log started (V3.0) Thu Apr 15 19:39:34 1999

Variable Name	Solution Value
x0_1	12.000000

Variable Name	Solution Value
x0_2	12.000000

The variable 'x0_3' is 0.

The variable 'x0_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x3_1	25.000000

Variable Name	Solution Value
x3_2	25.000000

The variable 'x3_3' is 0.

The variable 'x3_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x4_1	23.000000

Variable Name	Solution Value
x4_2	23.000000

The variable 'x4_3' is 0.

The variable 'x4_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x5_1	29.000000

Variable Name	Solution Value
x5_2	29.000000

The variable 'x5_3' is 0.

The variable 'x5_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x6_1	21.000000

Variable Name	Solution Value
x6_2	18.000000

The variable 'x6_3' is 0.

The variable 'x6_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x8_1	23.000000

Variable Name	Solution Value
x8_2	23.000000

The variable 'x8_3' is 0.

The variable 'x8_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x11_1	30.000000

Variable Name	Solution Value
x11_2	33.000000

The variable 'x11_3' is 0.

The variable 'x11_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x12_1	7.000000

Variable Name	Solution Value
x12_2	7.000000

The variable 'x12_3' is 0.

The variable 'x12_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x15_1	7.000000

Variable Name	Solution Value
x15_2	7.000000

The variable 'x15_3' is 0.

The variable 'x15_4' is 0.

Variable Name	Solution Value
x0_Total	24.000000

Variable Name	Solution Value
x3_Total	50.000000
Variable Name	Solution Value
x4_Total	46.000000
Variable Name	Solution Value
x5_Total	58.000000
Variable Name	Solution Value
x6_Total	39.000000
Variable Name	Solution Value
x8_Total	46.000000
Variable Name	Solution Value
x11_Total	63.000000
Variable Name	Solution Value
x12_Total	14.000000
Variable Name	Solution Value
x15_Total	14.000000