

PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM REFINARIA USANDO ALGORITMOS
GENÉTICOS: UM ESTUDO PARA O CASO DE *SCHEDULING* DE PETRÓLEOS

Debora Duarte Silvestre da Cruz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Prof. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, Ph.D.

Dr. Marcus Vinícius de Oliveira Magalhães, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2007

CRUZ, DEBORA DUARTE SILVESTRE
DA

Programação da Produção em Refinaria
usando Algoritmos Genéticos: um Estudo
para o Caso de *Scheduling* de Petróleos [Rio
de Janeiro] 2007

XIII, 139 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia de Produção, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Programação de Produção
2. Algoritmos Genéticos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Para meus pais, Eugenio e Fatima.

Agradecimentos

A Deus, pelas bênçãos concedidas.

Ao professor Virgílio José Martins Ferreira Filho, por aceitar a orientação deste trabalho, pelo apoio e incentivo prestados.

Ao Marcus Vinícius de Oliveira Magalhães e ao professor Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, por aceitarem o convite de compor a banca examinadora, pelas sugestões e apoio durante o período de realização deste trabalho.

Ao CENPES/PETROBRAS pela liberação e disponibilização de recursos para a conclusão desta dissertação.

Ao Rodrigo, meu amor, pela ajuda durante o curso de mestrado, principalmente durante o desenvolvimento desta dissertação, pelas incansáveis palavras de incentivo nos momentos de angústia e pela infinita paciência.

Aos meus pais, Eugenio e Fatima, pelo amor, pela dedicação, pela eterna compreensão e por me fazerem conhecer os verdadeiros tesouros da vida.

Aos meus irmãos, Fernanda e Leonardo, por serem presentes em minha vida e mostrarem o verdadeiro significado da palavra **irmão**.

Aos grandes amigos conquistados durante este curso: Luciana, Renato, Samuel, Victor e Wagner, pelos intermináveis finais de semana dedicados ao estudo e pela amizade construída. Em especial, agradeço aos amigos Luciana e Wagner, pelo acompanhamento da elaboração desta dissertação.

À secretária da área de Pesquisa Operacional, Andréia Lima da Silva Moreira, pelo suporte e ajuda durante o curso.

Aos colegas da gerência de Distribuição, Logística e Transporte do CENPES que contribuíram, direta ou indiretamente, para este trabalho. Em especial Luiz Fernando, Mariza e Roger pelas sugestões e revisão do texto e Adriana, Fernanda, Marcelo e

Miguel, pelo companheirismo e amizade.

Aos colegas da gerência de Programação de Produção da REFAP, pelas informações concedidas.

Aos colegas do ICA-PUC, André, Douglas e Omar pela inestimável colaboração.

A minha família, pela nossa união e pelo apoio.

A todos os demais amigos, pela grande torcida e por compreenderem minha ausência.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM REFINARIA USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS: UM ESTUDO PARA O CASO DE *SCHEDULING* DE PETRÓLEOS

Debora Duarte Silvestre da Cruz

Julho/2007

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Atividades de planejamento e *scheduling* recebem atenção cada vez maior nos últimos anos. Atualmente, as indústrias enfrentam um aumento de competitividade, resultando na necessidade do gerenciamento otimizado de seus recursos para a obtenção de respostas rápidas às oportunidades e às incertezas da operação, de modo que a tomada de decisões seja realizada com um alto nível de confiança.

O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento de um modelo baseado em algoritmos genéticos para o *scheduling* do sistema de petróleo da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP S.A.), o qual é composto de terminal, oleoduto, área de estocagem de cru e pelas unidades de destilação atmosférica da refinaria.

A modelagem baseada em algoritmo genético consistiu na definição de uma representação do cromossomo e da função de avaliação que levasse em conta os objetivos prioritários para a atividade de programação de petróleo. O modelo foi testado com cenários reais de programação de produção da REFAP S.A. e teve seus resultados comparados com soluções conhecidas para o problema.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

REFINERY SCHEDULING USING GENETIC ALGORITHMS: A STUDY FOR
CRUDE OIL SCHEDULING CASE

Debora Duarte Silvestre da Cruz

Julho/2007

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Industrial Engineering

Planning and scheduling activities have increasingly drawn attention in the past few years. As competition rises day by day, industries seek an optimized management of their resources in order to react quickly to operational uncertainties and opportunities and to make sound decisions.

The main goal of this study is to develop a model based on genetic algorithms appropriated for the scheduling of the oil system of Alberto Pasqualini Refinery (REFAP S.A.). This system includes a terminal, a pipeline, a crude oil stock area and the two atmospheric distillation units of the refinery.

The modeling based on genetic algorithms consisted in the definition of a chromosome representation and in the evaluation function that considered the priorities for the crude oil scheduling. The model was tested out in real production schedules of REFAP S.A. and had its results compared to the known solutions of the problem.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Escopo da Pesquisa	3
1.4 Conceitos Fundamentais	3
1.5 A Organização do Texto	5
2 Problemas de Programação de Produção	7
2.1 Classificação de Problemas de <i>Scheduling</i>	7
2.2 Soluções para Problemas de Programação da Produção	11
2.2.1 Representação Matemática	11
2.2.2 Modelos para <i>Scheduling</i> em Refinarias de Petróleo	13
2.2.3 Desafios da Programação de Produção Refinarias	15
3 Algoritmos Genéticos em Problemas de Scheduling	17
3.1 Conceitos Fundamentais	17
3.1.1 Componentes do Algoritmo Genético	19
3.2 Algoritmos Genéticos na Solução de Problemas de <i>Scheduling</i>	22
4 Programação de Produção em Refinaria de Petróleo	25
4.1 Introdução	25
4.2 Ambiente Operacional	27
4.2.1 Conceitos e Definições	27
4.2.2 Panorama Geral	28
4.2.3 Programação de Petróleos	32
5 Modelo de Algoritmo Genético Proposto para o Problema de <i>Scheduling</i> de Refinaria	34
5.1 Descrição da Operação dos Elementos do Modelo	34
5.1.1 Operação de Tanques	34
5.1.2 Operação do Oleoduto	35
5.1.3 Descarga de Navios	36
5.1.4 Tanques de Carga	38

5.1.5	Limites de Composição de Carga da UDA	38
5.1.6	Modo Operacional das Unidades de Destilação	39
5.2	Representação	40
5.2.1	Representação dos Indivíduos	40
5.2.2	Representação do Tempo	42
5.3	Decodificação	43
5.3.1	Descarga de Navio	43
5.3.2	Transferência pelo Oleoduto	45
5.3.3	Carga nas Unidades de Destilação	47
5.4	Avaliação	51
5.4.1	Avaliação da Solução pela Técnica de Distância do Valor ao Alvo	52
5.5	Operadores	54
6	Estudo de Caso	58
6.1	Experimentos Computacionais	58
6.1.1	Definição da Configuração dos Parâmetros do AG	60
6.1.2	Testes de Robustez do Modelo	62
6.1.3	Soluções das Instâncias	64
6.2	Comparação de Resultados	95
6.2.1	Programação 28/05/03	96
6.2.2	Programação 02/06/03	98
6.2.3	Programação 02/07/03	100
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	103
7.1	Propostas para Trabalhos Futuros	105
	Referências Bibliográficas	107
	Apêndices	110
A	Dados de Entrada	110
A.1	28/05/2003	110
A.2	02/06/2003	112
A.3	09/06/2003	113
A.4	16/06/2003	114
A.5	02/07/2003	115
B	Biblioteca GACOM	117
C	Resultados Adicionais	119
C.1	Soluções das Instâncias	119
C.1.1	09/06/2003	119
C.1.2	16/06/2003	128
C.2	Comparação de Resultados	136
C.2.1	09/06/2003	136
C.2.2	16/06/2003	138

Lista de Figuras

2.1	Esquema do problema um estágio, um processador	8
2.2	Esquema do problema um estágio, processadores paralelos	9
2.3	Esquema do problema tipo <i>flow-shop</i>	10
2.4	Esquema do problema tipo <i>job-shop</i>	10
3.1	Estrutura Geral dos Algoritmos Genéticos	18
3.2	Ciclo de operações dos Algoritmos Genéticos	20
4.1	Fluxo de Informações entre Planejamento, Programação e Operação . .	26
4.2	Localização no Mapa do Rio Grande do Sul	27
4.3	Esquema de Refino Simplificado - REFAP	29
4.4	Subsistema de Óleo Cru	30
5.1	Operação do Duto	36
5.2	Esquema de Representação do Indivíduo (Cromossomo)	41
5.3	Decodificação para a Tarefa de Descarga de Navio	44
5.4	Decodificação para a Tarefa de Transferência pelo Oleoduto	46
5.5	Decodificação para a Tarefa de Carga na UDA	50
6.1	Gráfico de Gantt - 28/05/03	65
6.2	Atendimento ao volume planejado U-01 - 28/05/03	72
6.3	Atendimento ao volume planejado U-50 - 28/05/03	72
6.4	API da carga U-01 - 28/05/03	73
6.5	API da carga U-50 - 28/05/03	73
6.6	Enxofre da carga U-01 - 28/05/03	74
6.7	Enxofre da carga U-50 - 28/05/03	74
6.8	Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 28/05/03	75
6.9	Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 28/05/03	75
6.10	Gráfico de Gantt - 02/06/03	76
6.11	Atendimento ao volume planejado U-01 - 02/06/03	82
6.12	Atendimento ao volume planejado U-50 - 02/06/03	82
6.13	API da carga U-01 - 02/06/03	83
6.14	API da carga U-50 - 02/06/03	83
6.15	Enxofre da carga U-01 - 02/06/03	84
6.16	Enxofre da carga U-50 - 02/06/03	84
6.17	Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 02/06/03	85

6.18	Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 02/06/03	85
6.19	Gráfico de Gantt - 02/07/03	86
6.20	Atendimento ao volume planejado U-01 - 02/07/03	91
6.21	Atendimento ao volume planejado U-50 - 02/07/03	91
6.22	API da carga U-01 - 02/07/03	92
6.23	API da carga U-50 - 02/07/03	92
6.24	Enxofre da carga U-01 - 02/07/03	93
6.25	Enxofre da carga U-50 - 02/07/03	93
6.26	Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 02/07/03	94
6.27	Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 02/07/03	94
6.28	Comparação Número de Trocas de Tanques - 28/05/2003	97
6.29	Comparação Ociosidade do OSCAN - 28/05/2003	97
6.30	Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 28/05/2003 .	98
6.31	Comparação Número de Trocas de Tanques - 02/06/2003	99
6.32	Comparação Ociosidade do OSCAN - 02/06/2003	99
6.33	Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 02/06/2003 .	100
6.34	Comparação Número de Trocas de Tanques - 02/07/2003	101
6.35	Comparação Ociosidade do OSCAN - 02/07/2003	101
6.36	Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 02/07/2003 .	102
C.1	Gráfico de Gantt - 09/06/03	119
C.2	Atendimento ao volume planejado U-01 - 09/06/03	124
C.3	Atendimento ao volume planejado U-50 - 09/06/03	124
C.4	API da carga U-01 - 09/06/03	125
C.5	API da carga U-50 - 09/06/03	125
C.6	Enxofre da carga U-01 - 09/06/03	126
C.7	Enxofre da carga U-50 - 09/06/03	126
C.8	Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 09/06/03	127
C.9	Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 09/06/03	127
C.10	Gráfico de Gantt - 16/06/03	128
C.11	Atendimento ao volume planejado U-01 - 16/06/03	132
C.12	Atendimento ao volume planejado U-50 - 16/06/03	132
C.13	API da carga U-01 - 16/06/03	133
C.14	API da carga U-50 - 16/06/03	133
C.15	Enxofre da carga U-01 - 16/06/03	134
C.16	Enxofre da carga U-50 - 16/06/03	134
C.17	Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 16/06/03	135
C.18	Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 16/06/03	135
C.19	Comparação Número de Trocas de Tanques - 09/06/2003	136
C.20	Comparação Ociosidade do OSCAN - 09/06/2003	137
C.21	Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 09/06/2003 .	137
C.22	Comparação Número de Trocas de Tanques - 16/06/2003	138
C.23	Comparação Ociosidade do OSCAN - 16/06/2003	138
C.24	Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 16/06/2003 .	139

Lista de Tabelas

3.1	Principais Tipos de Representação em Algoritmos Genéticos	20
4.1	Identificação e Capacidade dos Tanques (TEDUT e REFAP)	30
4.2	Famílias de Petróleos Processados na REFAP	31
4.3	Petróleos Processados na REFAP	31
5.1	Serviços de Tanques de Petróleo	35
5.2	Limites de composição de entrada das UDAs	39
5.3	Possíveis Campanhas por UDA	39
5.4	Planejamento UDA - Cenário 02/07/2003	47
6.1	Valores Testados para Parâmetros de AG	61
6.2	Características e Valores da Configuração de Parâmetros	61
6.3	Resultados da função de avaliação para a melhor configuração	61
6.4	Resultados do Teste de Robustez - CONFIG 1	63
6.5	Principais características das instâncias	64
6.6	Resultados das instâncias usando o modelo de AG	65
6.7	Resultados de Atendimento à Demanda - 28/05/03	66
6.8	Informações de programação de carga da U-01 - 28/05/03	67
6.9	Informações de programação de carga da U-50 - 28/05/03	67
6.10	Informações de movimentação de itens de cru - 28/05/03	69
6.11	Informação de utilização de duto - 28/05/03	70
6.12	Informações de descarregamento de navio - 28/05/03	71
6.13	Número de trocas de tanques - 28/05/03	76
6.14	Resultados de Atendimento à Demanda - 02/06/03	77
6.15	Informações de programação de carga da U-01 - 02/06/03	78
6.16	Informações de programação de carga da U-50 - 02/06/03	78
6.17	Informações de movimentação de itens de cru - 02/06/03	79
6.18	Informação de utilização de duto - 02/06/03	80
6.19	Informações de descarregamento de navio - 02/06/03	81
6.20	Número de trocas de tanques - 02/06/03	86
6.21	Resultados de Atendimento à Demanda - 02/07/03	87
6.22	Informações de programação de carga da U-01 - 02/07/03	87
6.23	Informações de programação de carga da U-50 - 02/07/03	88
6.24	Informações de movimentação de itens de cru - 02/07/03	89
6.25	Informação de utilização de duto - 02/07/03	90

6.26	Informações de descarregamento de navio - 02/07/03	90
6.27	Número de trocas de tanques - 02/07/03	95
6.28	Características básicas dos modelos	96
A.1	Informação Inicial de Tanques - 28/05/2003	110
A.2	Informação Inicial de Duto - 28/05/2003	111
A.3	Informação de Descarregamento de Navio - 28/05/2003	111
A.4	Informação de Linha Submarina - 28/05/2003	111
A.5	Informação de Planejamento de UDA - 28/05/2003	111
A.6	Informação Inicial de Tanques - 02/06/2003	112
A.7	Informação Inicial de Duto - 02/06/2003	112
A.8	Informação de Descarregamento de Navio - 02/06/2003	112
A.9	Informação de Linha Submarina - 02/06/2003	112
A.10	Informação de Planejamento de UDA - 02/06/2003	113
A.11	Informação Inicial de Tanques - 09/06/2003	113
A.12	Informação Inicial de Duto - 09/06/2003	113
A.13	Informação de Descarregamento de Navio - 09/06/2003	113
A.14	Informação de Linha Submarina - 09/06/2003	114
A.15	Informação de Planejamento de UDA - 09/06/2003	114
A.16	Informação Inicial de Tanques - 16/06/2003	114
A.17	Informação Inicial de Duto - 16/06/2003	114
A.18	Informação de Planejamento de UDA - 16/06/2003	115
A.19	Informação Inicial de Tanques - 02/07/2003	115
A.20	Informação Inicial de Duto - 02/07/2003	115
A.21	Informação de Descarregamento de Navio - 02/07/2003	116
A.22	Informação de Linha Submarina - 02/07/2003	116
A.23	Informação de Planejamento de UDA - 02/07/2003	116
C.1	Resultados de Atendimento à Demanda - 09/06/03	120
C.2	Informações de programação de carga da U-01 - 09/06/03	121
C.3	Informações de programação de carga da U-50 - 09/06/03	121
C.4	Informações de movimentação de itens de cru - 09/06/03	122
C.5	Informação de utilização de duto - 09/06/03	123
C.6	Informações de descarregamento de navio - 09/06/03	123
C.7	Número de trocas de tanques - 09/06/03	128
C.8	Resultados de Atendimento à Demanda - 16/06/03	129
C.9	Informações de programação de carga da U-01 - 16/06/03	129
C.10	Informações de programação de carga da U-50 - 16/06/03	130
C.11	Informações de movimentação de itens de cru - 16/06/03	131
C.12	Informação de utilização de duto - 16/06/03	131
C.13	Número de trocas de tanques - 16/06/03	136

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

No contexto da indústria de processo químico, podem-se classificar as refinarias de petróleo como as plantas mais complexas, por envolverem processos diferentes e complicados, com várias possibilidades de interligação (AIRES 2005). O objetivo de uma refinaria é gerar máximo lucro através da conversão de diferentes tipos de óleo cru em produtos de maior valor agregado.

A maioria das decisões de planejamento envolvidas na busca do ponto operacional ótimo, apesar de sua complexidade, ainda é baseada em regras heurísticas ou em modelos lineares simplificados. Até a década de 90, devido ao elevado custo e à ineficiência dos recursos computacionais disponíveis, as aplicações de *scheduling* ficaram limitadas a problemas de menor dimensão e complexidade, não correspondendo a problemas reais. Nos anos seguintes, com a evolução da programação matemática, principalmente na solução de problemas combinatórios, aliada à disponibilidade de sistemas de informação mais eficientes e ao aumento da competição entre as indústrias (que exige redução de custos operacionais), os problemas de *scheduling* tornaram-se um tema de grande importância para o setor industrial.

Ao longo da última década, problemas de *scheduling* na indústria do petróleo foram alvo de muitas pesquisas utilizando computação evolucionária. Nesse contexto, (SIMÃO 2004) testou o desempenho de algoritmos genéticos (AG) em um estudo de caso com características semelhantes às de uma refinaria de petróleo; (CASTRO 2001)

utilizou a técnica a fim de propor uma solução para o problema de programação do sistema de produção e armazenamento de gás liquefeito de petróleo na Refinaria Henrique Lage (REVAP) e (ALMEIDA 2001) desenvolveu, também para a REVAP, uma solução usando algoritmos genéticos aliada a um sistema baseado em regras para a otimização da programação de produção de óleos combustíveis.

1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo desta dissertação é estudar a aplicabilidade e o desempenho da computação evolucionária na otimização da programação da produção de uma refinaria, com atenção especial para o *scheduling* de petróleo. Consideram-se como programação de petróleo todas as atividades envolvidas nos processos de movimentação e transferência de óleo cru.

Os principais objetivos da programação de petróleos envolvem:

- a minimização do desvio entre as metas de volume estipuladas no plano de produção e o volume programado;
- a minimização das trocas de tanques durante as transferências de petróleo;
- a minimização do tempo de sobreestadia de navios;
- a manutenção de níveis de estoque seguros na refinaria.

Tais objetivos serão abordados e explicados com mais detalhes ao longo do trabalho.

Ao final desta dissertação, pretende-se:

- analisar o processo de *scheduling* da refinaria e identificar suas atividades principais;
- analisar a aplicabilidade da otimização por computação evolucionária para o problema de programação da produção;
- comparar o modelo desenvolvido, bem como os resultados obtidos com a abordagem proposta por (MAGALHÃES 2004).

1.3 Escopo da Pesquisa

A pesquisa que originou esta dissertação consistiu nas seguintes etapas: estudo de programação de produção em uma refinaria do grupo Petrobras; definição de um modelo usando algoritmos genéticos para o problema de otimização da programação de petróleo; avaliação dos resultados do modelo frente a cenários reais de programação e comparação do modelo e dos resultados com pesquisas anteriores.

A planta que serviu como objeto de estudo desta pesquisa foi a da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP S.A.), localizada em Canoas - RS. O estudo da programação de produção baseou-se no levantamento de informações e de regras operacionais envolvidas neste processo e executadas pelo programador da refinaria, além do estudo de formas de representação usadas para solucionar problemas de programação de produção neste tipo de planta, com o uso de técnicas de programação matemática clássica e de computação evolucionária.

A modelagem do algoritmo genético consistiu no estudo de representações utilizadas para problemas de *scheduling*, optando-se pela representação que emprega cromossomo baseado em ordem. A definição da função de avaliação baseou-se na solução do problema de otimização da programação de petróleo, que envolve o recebimento de petróleo no terminal, a determinação dos tanques para alocação do mesmo, a transferência do petróleo para a refinaria através de duto e definição da carga para as unidades de destilação. Foi utilizada a biblioteca de algoritmos genéticos GACOM, cujos operadores implementados para representações baseadas em ordem são: *crossover* de mapeamento parcial (PMX - *partially mapped crossover*), *crossover* de ordem (OX - *order crossover*), *crossover* de ciclo (CX - *cycle crossover*), mutação por troca (*swap mutation*) e mutação por inversão de posição (PI - *position inversion*) (MICHALEWICZ 1996).

1.4 Conceitos Fundamentais

De acordo com o *Supply Chain Council* (www.supply-chain.org), define-se cadeia de suprimentos como “todos os recursos interligados e atividades requeridas para produzir e entregar produtos e serviços a cliente”.

A intensa competição nos mercados globais, a introdução de produtos com ci-

culos de vida reduzidos e a grande expectativa dos clientes têm forçado as empresas a investir e a focar sua atenção na cadeia de suprimentos. Esses fatores, aliados aos avanços das tecnologias de comunicação e transporte promoveram a contínua evolução da cadeia de suprimentos e das técnicas utilizadas no seu gerenciamento (SIMCHI-LEVI, KAMINSKY & SIMCHI-LEVI 2003).

Nos últimos anos, muitas empresas preocuparam-se com o aprimoramento da performance da cadeia de suprimento, por considerá-la fator essencial para a manutenção da vantagem competitiva. Tal cenário reflete-se também na indústria de petróleo, uma vez que as margens são reduzidas e há dificuldade em obter diferenciação de produtos. Em um ambiente competitivo, companhias de petróleo lidam com variações significativas de parâmetros econômicos, oportunidades de utilização de cargas diversas e decisões diárias entre comprar ou produzir determinado produto para atender a demanda de um cliente (CASTRO 2001). Segundo (MAGALHÃES 2004), com a produção mundial na faixa de 13.500.000 m³ de petróleo por dia¹, é razoável admitir que qualquer ferramenta tecnológica capaz de suportar ou melhorar o processo de tomada de decisão na indústria de petróleo pode levar a benefícios consideráveis.

As tomadas de decisão na indústria de petróleo são realizadas em três níveis: estratégico, tático e operacional (KONG 2002). O nível estratégico engloba decisões de longo prazo (normalmente anos) e lidam com objetivos corporativos. As decisões de nível tático cobrem um horizonte de médio prazo (meses, semestres) e preocupam-se com a organização das metas de estratégia corporativa em um planejamento mais detalhado. Finalmente, decisões de nível operacional são tomadas em curto prazo (semanas, dias), onde o horizonte de tempo pode variar de horas a meses. Os principais exemplos de decisões tomadas neste nível são: programação de produção, gerenciamento de estoques, otimização das unidades de processamento, misturas, movimentação e controle (MAGALHÃES 2004).

Existe uma considerável quantidade de trabalhos na área de planejamento estratégico das refinarias, onde é muito utilizada a programação linear. A programação não-linear também vem sendo cada vez mais utilizada e transformando-se em uma metodologia para o planejamento e a otimização da refinaria em tempo real. Entretanto, poucas publicações apareceram direcionadas à programação de produção (ou

¹Fonte: www.worldoil.com (produção média de 2006)

scheduling operacional) de curto prazo da refinaria (AIRES 2005).

A ausência de ferramentas computacionais adequadas no nível da programação da produção compromete o desempenho da hierarquia de decisões, uma vez que esta atividade possui interface com o planejamento e com o controle de processos. Sendo assim, percebe-se que, diante da ausência de soluções computacionais, não é possível obter uma desagregação consistente das informações geradas no planejamento (interface *planning - scheduling*) e traduzir os objetivos de produção de curto prazo em condições operacionais para as unidades de processamento (interface *scheduling - controle de processos*) (MORO 2000).

Devido às interfaces citadas no parágrafo acima, o *scheduling* está mais sujeito aos efeitos de alterações nas condições operacionais das unidades e do mercado (quebra de equipamentos, alterações de mercado, perda de qualidade dos produtos e outros), podendo gerar respostas rápidas de custos reduzidos. Sendo assim, diversas empresas vêm investindo na busca e desenvolvimento de ferramentas de apoio ao *scheduling* de produção.

Segundo (BODINGTON 1995), os programadores de produção (*schedulers*) estão continuamente avaliando a capacidade do processo produtivo com as necessidades do negócio, reagindo diariamente às variabilidades do processo e do negócio. Assim, entende-se que a programação de produção enfatiza a viabilidade do processo, uma vez que através dela deve ser gerado um *scheduling* executável e capaz de projetar as conseqüências de possíveis quebras ou mudanças na programação.

1.5 A Organização do Texto

Esta dissertação encontra-se dividida em seis capítulos adicionais descritos a seguir.

O capítulo 2 aborda características de problemas de programação de produção e faz uma breve revisão bibliográfica sobre o assunto. Enquanto o capítulo 3 referencia propostas que adotaram algoritmos genéticos como solução para a otimização deste tipo de problema.

O capítulo 4 apresenta o problema de programação de produção específico para a área de cru da REFAP.

O modelo proposto é apresentado no capítulo 5, através do detalhamento da repre-

sentação utilizada, da função de avaliação e dos operadores genéticos.

O capítulo 6 descreve e analisa os experimentos realizados e resultados obtidos.

Finalmente, o capítulo 7 apresenta as conclusões e contribuições deste trabalho e sugere novas direções para sua continuação.

Capítulo 2

Problemas de Programação de Produção

De maneira geral, problemas de programação de produção têm como principal objetivo a alocação de recursos para determinadas tarefas ao longo de um horizonte de tempo, respeitando diversas restrições e otimizando um ou mais objetivos. Uma tarefa é completada por uma seqüência pré-definida de operações e o resultado da programação consiste num plano com os instantes iniciais e finais de cada operação e os recursos a ela associados (BÄCK, FOGEL & MICHALEWICZ 1997).

2.1 Classificação de Problemas de *Scheduling*

O problema de programação da produção pode ser avaliado sob três aspectos: geração de pedidos, complexidade do processo produtivo e critérios de programação.

Geração de Pedidos

A geração de pedidos pode ser analisada da seguinte maneira:

Produção empurrada (*make to stock*): determinada de acordo com a previsão de vendas, que é, por sua vez, baseada em fatores como: o histórico de vendas, a sazonalidade do produto e a previsão de crescimento do mercado. Na produção empurrada, a ordem de fabricação antecipa os acontecimentos reais e a produção pode finalizar a cadeia com falta ou excesso de produto.

Isso pode gerar uma impossibilidade de atendimento satisfatório do pedido do cliente ou aumento desnecessário do nível de estoque.

Produção puxada (*make to order*): esse sistema possui maior flexibilidade de produção. A ordem de fabricação atende a uma situação real de vendas (variação de estoque). É realizado monitoramento constante dos estoques, a fim de mantê-los sempre em um limite mínimo. Conseqüentemente, este tipo de abordagem gera custos de estoque maiores.

Complexidade do Processo Produtivo

A complexidade do processo produtivo pode ser verificada quanto às relações entre a fabricação de cada tarefa e os recursos utilizados. As relações existentes entre as etapas de produção podem ser subdivididas de acordo com a descrição abaixo.

Um estágio, um processador para cada ordem de fabricação: consiste na forma mais simples do problema. Todas as tarefas requerem um único passo no processamento, que deve ser executado em único recurso (máquina ou operador). A figura 2.1 mostra um exemplo onde as tarefas 1, 2, 3 e 4 possuem funções diferentes, assim como as ordens de fabricação são tarefas diferentes.

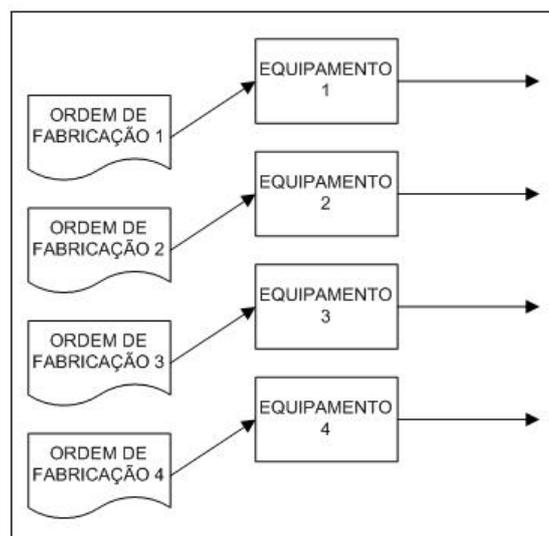


FIGURA 2.1: Esquema do problema um estágio, um processador

Um estágio, processadores paralelos: similar ao problema anterior, no entanto, cada tarefa requer um único passo de processamento, o qual pode ser executado em qualquer um dos processadores paralelos. A figura 2.2 apresenta o esquema com quatro recursos, onde os equipamentos 1, 2, 3 e 4 possuem a mesma função e as ordens de fabricação solicitam o mesmo equipamento.

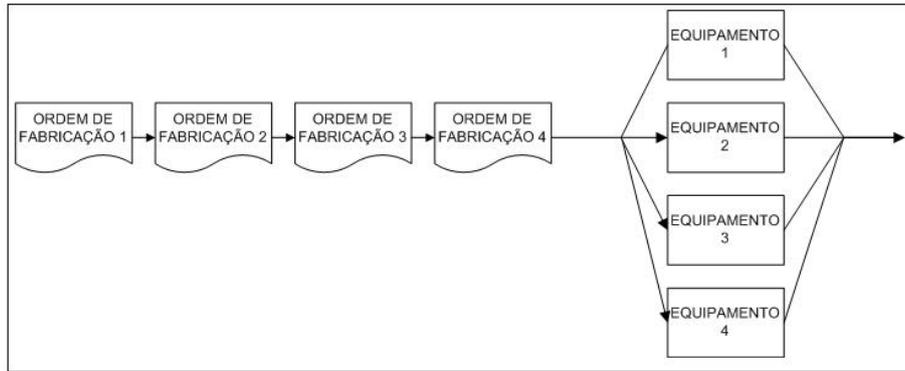


FIGURA 2.2: Esquema do problema um estágio, processadores paralelos

Múltiplos estágios, mesma seqüência (*flow-shop* ou planta multi-produto): nos casos de múltiplos estágios, cada tarefa requer processamento em um conjunto de recursos distintos, onde tipicamente existe uma severa ordem de precedência operacional a ser obedecida nas etapas de processamento de cada tarefa. As soluções viáveis satisfazem as relações de precedência. Um ambiente de produção é definido como *flow-shop* quando todas as tarefas devem ser processadas em um mesmo conjunto de processadores e na mesma seqüência de processamento, existindo portanto, um único sentido no fluxo do processamento. A figura 2.3 mostra um ambiente de produção *flow-shop* onde os equipamentos 1, 2, 3 e 4 possuem funções diferentes e as ordens de fabricação 1, 2 e 3 são de produtos diferentes, que utilizam a mesma seqüência de equipamentos (3, 1, 2, 4).

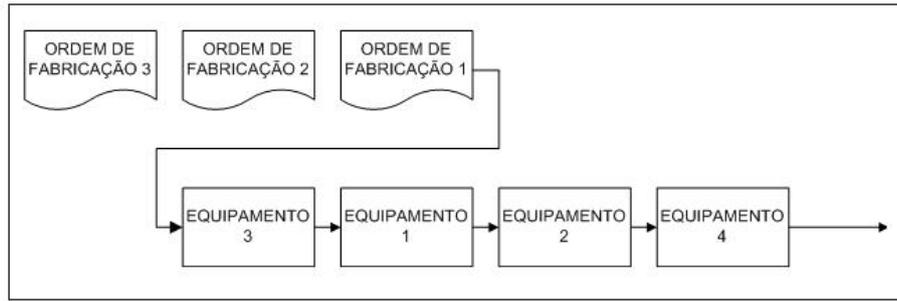


FIGURA 2.3: Esquema do problema tipo *flow-shop*

Múltiplos estágios, várias seqüências (*job-shop* ou planta multi-processo): define-se um ambiente de produção como sendo do tipo *job-shop* quando não há restrições nos passos de processamento para cada tarefa, portanto, não existe um único fluxo. Uma tarefa pode ser processada por rotas alternativas. O problema do tipo *job-shop* corresponde a um problema da programação da produção na sua forma mais geral. Na figura 2.4, os equipamentos 1, 2, 3 e 4 possuem funções diferentes e as ordens de fabricação 1 e 2 são de produtos diferentes que utilizam seqüências diferentes, como mostra a tabela anexa a figura.

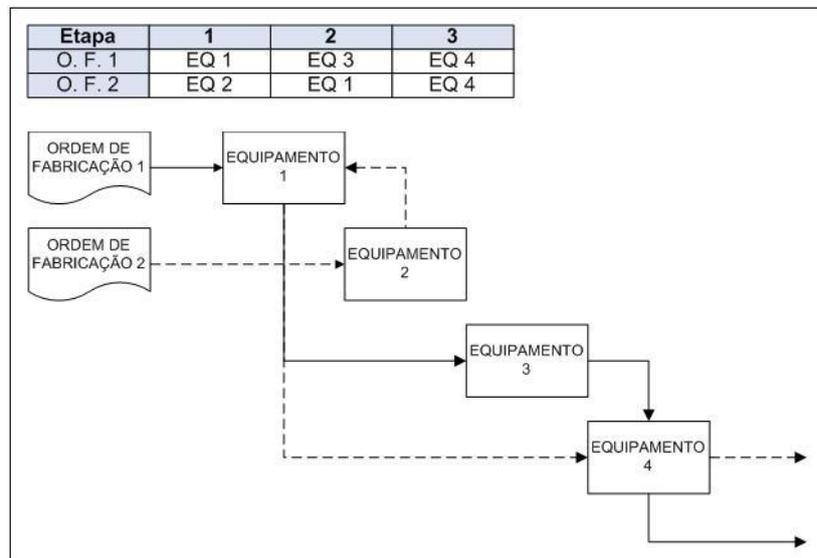


FIGURA 2.4: Esquema do problema tipo *job-shop*

Critérios de Programação

Neste caso, duas classes abrangentes de critérios de avaliação são consideradas: referente ao custo de programação e referente ao desempenho da programação. Os custos de programação de um programa de produção particular compreendem custos fixos associados com *setup*, estocagem de produtos e de materiais e custos referentes a atrasos de entregas. O desempenho de um programa de produção pode ser avaliado por medidas como: níveis de utilização dos recursos produtivos, percentuais de tarefas concluídas com atraso, tempo médio de processamento de tarefas ou itens, tempo total de processamento das tarefas e tempo médio ou máximo de atraso. Em grande parte dos ambientes de produção, a avaliação da programação da produção é feita através da combinação dessas duas classes (MAZZUCCO JÚNIOR 1999).

2.2 Soluções para Problemas de Programação da Produção

2.2.1 Representação Matemática

A primeira tarefa para a solução de problemas de programação de produção consiste na identificação de uma representação geral do processo a ser modelado. Proposto por (KONDILI, PANTELIDES & SARGENT 1993), o conceito de “Rede Estado-Tarefa” (*State-Task Network* - STN) fornece uma representação específica do processo. A formulação considera que *estados* (materiais: matéria-prima, produtos intermediários e acabados) são produzidos e/ou consumidos por *tarefas* (etapas do processamento), cuja receita é conhecida. Os elementos são nós de uma rede, modelada como um problema de programação linear inteira mista, usando representação discreta do tempo.

A representação “Rede Estado-Tarefa” não contempla detalhes relacionados aos recursos da planta. Assim, um certo número de parâmetros associados aos recursos disponíveis deve ser incluído adicionalmente. Como extensão dessa representação, (PANTELIDES 1994) propôs a “Rede Recurso-Tarefa” (*Resource-Task Network* - RTN), a qual lida com recursos de maneira unificada. Tais recursos, sejam eles matérias-

primas, produtos intermediários, produtos acabados, utilidades, mão-de-obra ou equipamentos de processamento, armazenamento e transporte são tratados da mesma maneira (MORO 2000) e qualquer recurso pode ser produzido ou consumido por uma tarefa a qualquer momento durante sua execução.

(BARBOSA-PÓVOA & PANTELIDES 1997) aplicaram o conceito de RTN para desenhar o problema de plantas multipropósito em batelada, assumindo a representação discreta do tempo. O problema foi formulado por programação linear inteira mista e variáveis binárias foram usadas para representar escolhas operacionais e estruturais a serem realizadas. O exemplo apresentado pelos autores poderia ter sido resolvido usando a aproximação STN proposta anteriormente por (BARBOSA-PÓVOA & MACCHIETTO 1994). No entanto, segundo os autores, o potencial real da formulação torna-se mais evidente quando são considerados sistemas mais complexos, tais como os que envolvem operações multiplanta com interação entre as áreas de produção e distribuição.

Freqüentemente, os modelos apresentados são muito complexos para serem resolvidos com as capacidades de *hardware* e *software* disponíveis atualmente. Dessa forma, diferentes aproximações devem ser seguidas por “modeladores” a fim de lidar com a questão da “intratabilidade”.

Uma revisão atualizada do estado da arte em métodos de otimização para problemas de *scheduling* de processos em batelada é apresentada por (MÉNDEZ, CERDÁ, GROSSMANN, HARJUNKOSKI & FAHL 2006). Os autores revisitam a classificação de problemas de *scheduling*, em seguida é apresentado um esquema detalhado para classificação dos modelos de otimização, focados em quatro aspectos principais: representação do tempo, balanço material, representação de eventos e função objetivo. São propostos modelos de equações e variáveis específicas, envolvidas nos trabalhos mais relevantes para os diferentes tipos de representações por eventos. Após a realização de comparações entre dois casos de estudos reconhecidamente estabelecidos na indústria de processos, com o objetivo de verificar desempenho computacional, eficiência e limitações das aproximações, são levantados exemplos do mundo real, a fim de destacar as limitações dos métodos atuais. Uma análise do uso de métodos exatos em problemas industriais é feita e afirma-se que o uso de técnicas baseadas em otimização podem ser utilizadas em conjunto com técnicas capazes de manter o número de decisões

num nível razoável (como por exemplo métodos heurísticos, técnicas de decomposição e agregação). Finalmente, são levantados *softwares* comerciais e acadêmicos voltados para o problema de *scheduling* e verifica-se que os mesmos ainda se encontram distantes de problemas reais de programação da produção.

2.2.2 Modelos para *Scheduling* em Refinarias de Petróleo

Modelos baseados em Programação Linear Inteira Mista (MILP) e em Programação Não Linear Inteira Mista (MINLP) foram propostos ao longo da última década para a solução do problema de programação de produção em refinarias de petróleo. (SHAH 1996) propôs um modelo para a solução do problema de *scheduling* de petróleo, envolvendo um terminal (incluindo a estrutura para descarregamento de navio), um oleoduto e uma refinaria (composta pela área de armazenamento de cru e por duas unidades de destilação). Foi sugerida a decomposição do problema em modelos de *downstream* e de *upstream*, resolvidos sequencialmente. O problema de *downstream* minimiza o volume de lastro nos tanques de petróleo, obedecendo às regras operacionais de alimentação da unidade de destilação, de suprimento de óleo pelo duto e de estocagem de óleo nos tanques. O problema de *upstream* preocupa-se com a determinação de soluções viáveis para a operação do terminal, em função do resultado gerado pelo modelo de *downstream*. O autor adotou a representação discreta do tempo e o modelo foi aplicado para o seguinte cenário: um terminal, incluindo oito tanques e a estrutura para o descarregamento dos navios, um oleoduto e uma refinaria, com sete tanques para armazenamento de óleo e duas unidades de destilação.

(LEE, PINTO, GROSSMANN & PARK 1996) propuseram um modelo de programação linear inteira mista para o problema de descarregamento de petróleo com gerenciamento do estoque de uma refinaria que processa vários tipos de cru, usando representação discreta do tempo com intervalos iguais e equações de balanço de massa aplicadas a cada intervalo. Não foi considerada movimentação em duto. Além disso, os autores assumiram que operações de mistura em tanques no terminal não são permitidas e os tanques de carga (refinaria) trabalham com valores aproximados de composição de componentes (propriedades consideradas no modelo). Foram apresentados quatro exemplos de aplicação do modelo, a fim de indicar o desempenho do mesmo.

(MORO 2000) dedica-se à análise da modelagem da variável tempo, utilizando o problema de gerenciamento da área de óleo cru de uma refinaria, comparando as abordagens discreta e contínua de divisão do horizonte de tempo em fatias. Notou-se o impacto da representação do tempo sobre o número de variáveis de decisão e sua influência na viabilidade da solução. O esquema de fatias de tempo de duração variável reduziu o número de variáveis binárias, que permitiu a discretização das relações não lineares, mantendo o problema linear. Não foram consideradas restrições e características relacionadas com a qualidade do petróleo, tampouco com o rendimento de derivados esperado.

Mais tarde, (MÁS & PINTO 2003) descreveram a aplicação de técnicas de otimização inteira mista para modelar o suprimento de petróleo em um complexo real de rede de distribuição, englobando um terminal, quatro refinarias, oito dutos e quatro estações de bombeamento, localizado em São Paulo. Devido ao tamanho do problema, foi desenvolvida uma estratégia de decomposição para programação linear inteira mista, o sistema foi dividido em quatro sub problemas e adotou-se a representação de tempo contínua do tempo.

Recentemente (MORO & PINTO 2004) revisitaram o trabalho desenvolvido por (MORO 2000) e (PINTO, JOLY & MORO 2000) com o objetivo de estender a formulação linear do problema de programação da área de cru e tratá-lo como um problema de programação não linear inteira mista, usando a representação contínua do tempo.

O trabalho de (MAGALHÃES 2004) buscou a solução para o problema de programação de produção de uma refinaria de petróleo e a solução adotada foi a decomposição do problema de programação da refinaria em dois subsistemas: *scheduling* da área de cru e *scheduling* de produtos. A área de cru compreende um terminal, um oleoduto, a área de armazenagem de cru na refinaria e as unidades de destilação. O método de solução adotado inclui a técnica de decomposição baseada na topologia da planta. O *scheduling* da área de cru foi modelado como um problema de programação não linear inteira mista, usando formulações discreta e contínua para representação do tempo e os modelos foram testados com dados reais da REFAP. O custo computacional do modelo contínuo foi muito grande para que o mesmo possa ser considerado “utilizável”. Os tempos de solução podem, no entanto, ser diminuídos, utilizando-se uma série de técnicas focadas em redução do espaço de busca, pela eliminação de soluções

fisicamente inviáveis. Por esse motivo o modelo discreto foi desenvolvido pelo autor, apresentando resultados atrativos para cinco cenários reais de programação da área de cru da refinaria.

2.2.3 Desafios da Programação de Produção Refinarias

De acordo com (VALLEUR & GRUE 2004), de maneira geral, problemas de *scheduling* em refinarias de petróleo podem ser formulados considerando os seguintes dados:

- resultado do planejamento de produção para um determinado horizonte de tempo;
- informação atualizada sobre níveis de estoques, condições de processo e disponibilidade de equipamentos;
- receitas e levantamentos futuros de qualidade, volumes e datas;
- restrições conhecidas e eventos inesperados.

Com o objetivo de encontrar as melhores datas para:

- misturas de cru para carga da unidade de destilação;
- trocas de tanques para alocação de óleo cru, produtos intermediários e produtos acabados;
- mudanças de campanha;
- operações de movimentação de óleo, tais como transferência de tanques;
- operações em batelada, como misturas e movimentações através de recursos compartilhados;
- mudanças em receitas de mistura de produtos finais.

Do ponto de vista matemático, este tipo de problema é bastante desafiador, uma vez que combina representações discreta e contínua do tempo com centenas de variáveis de decisão discretas.

Considera-se o *scheduling* como a parte central da área de *Process Operations* (PINTO & GROSSMANN 1998), uma vez que se trata de uma atividade complexa

que engloba a coleção, a coordenação e a interpretação de um grande volume de dados, uma estratégia financeira e a solução de problemas combinatórios difíceis (JOLY 1999). O *scheduling* é um processo iterativo que promove a interação entre esses elementos, repetindo-se toda vez que uma nova informação se torna disponível.

Sendo assim, o *scheduling* é visto como uma atividade integradora (DOYLE, PEKONY, REKLAITIS & VENKATASUBRAMANIAN 1997) e por esta razão, demanda muito tempo do programador, cujo trabalho consiste em integrar informações originárias de várias fontes, as quais se apresentam em variadas formas, desde planilhas eletrônicas até documentos recebidos “em papel”.

A solução de problemas de *scheduling* complexos, como é o caso de refinarias de petróleo, inviabiliza a execução de análises de sensibilidade, forçando o programador a executar as rotinas de programação toda vez que é verificada alguma alteração relevante no cenário inicialmente previsto.

Fatores adicionais que contribuem para a dificuldade de problemas de *scheduling* são apresentados por (LEE & DAGLI 1997):

- decisões de *scheduling* podem depender de outras externas às atribuições do programador;
- existência de eventos aleatórios pode estar associada ao problema;
- multiplicidade de objetivos;
- problemas de *scheduling* são normalmente pertencentes à classe de problemas *NP-hard*.

Capítulo 3

Algoritmos Genéticos em Problemas de Scheduling

3.1 Conceitos Fundamentais

Algoritmos genéticos são métodos de busca estocástica, inspirados no princípio Darwiniano de evolução das espécies. Segundo a teoria de Darwin, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Indivíduos com maior número de descendentes têm mais chance de perpetuarem seus códigos genéticos nas próximas gerações. Tais códigos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomos. Esses princípios são imitados na construção de algoritmos computacionais, que buscam uma melhor solução para um determinado problema por meio da evolução de populações de soluções codificadas através de cromossomos artificiais (PACHECO, VELLASCO & LOPES 1999). A figura 3.1 apresenta esquematicamente o funcionamento básico dos algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos diferem de técnicas de busca convencionais, uma vez que são inicializados com um **conjunto inicial de soluções**, chamado **população**. Cada indivíduo na população é chamado de **cromossomo** e representa uma possível solução para o problema. Os **cromossomos** evoluem através de iterações sucessivas (**gerações**) e durante cada **geração**, os mesmos são avaliados através de uma medida de **aptidão**. Para criar a nova **geração**, **cromossomos descendentes** são formados tanto

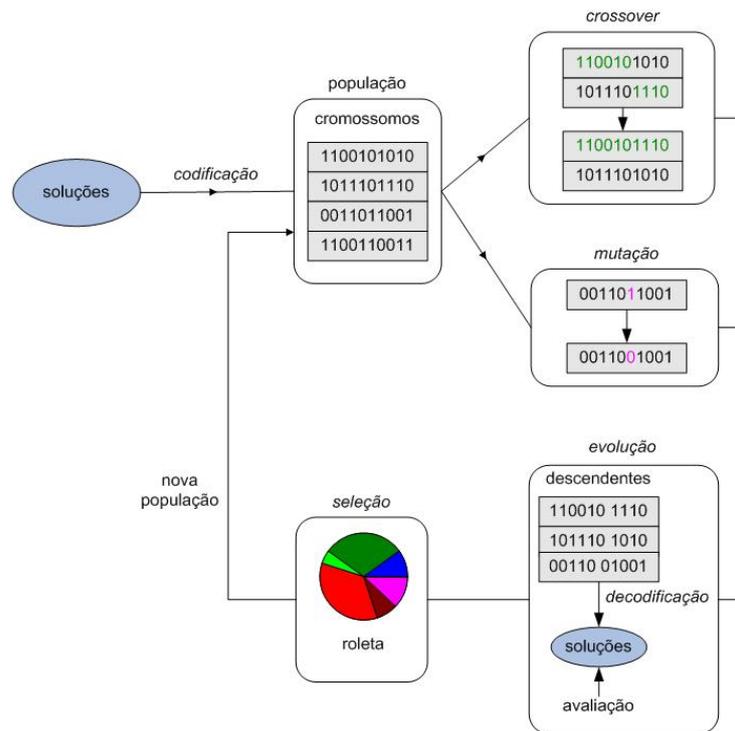


FIGURA 3.1: Estrutura Geral dos Algoritmos Genéticos

pele cruzamento entre dois cromossomos da mesma geração, utilizando um operador de ***crossover***, quanto pela modificação de um cromossomo, usando um operador de ***mutação***. Uma nova geração é formada por: ***seleção***, em função dos valores de aptidão, de alguns “progenitores” e “descendentes” e pela rejeição dos demais, de modo a manter o tamanho da população constante. Após algumas gerações, o algoritmo converge para o melhor cromossomo, que deve representar a solução ótima ou subótima do problema (GEN & CHENG 1996).

(GEN & CHENG 1996) destacam resumidamente alguns pontos que diferem os algoritmos genéticos de procedimentos de busca e otimização convencionais.

- algoritmos genéticos trabalham com a codificação de um conjunto de soluções e não diretamente com as soluções;
- algoritmos genéticos procuram a solução ótima a partir de um conjunto de soluções (população) e não de uma solução apenas;
- algoritmos genéticos utilizam informação de “*payoff*” (resultado da função de

avaliação) e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;

- algoritmos genéticos baseiam-se em regras probabilísticas e não determinísticas.

Algoritmos genéticos tornam-se particularmente interessantes devido ao fato de executarem uma busca direcional múltipla, mantendo uma população de potenciais soluções. A cada geração as melhores soluções são reproduzidas e as soluções ruins são descartadas.

3.1.1 Componentes do Algoritmo Genético

Os algoritmos genéticos podem ser caracterizados através dos seguintes componentes (ALMEIDA 2001):

- problema a ser otimizado;
- representação das soluções do problema;
- decodificação do cromossomo;
- avaliação;
- seleção;
- operadores genéticos;
- inicialização da população;
- parâmetros de execução;
- critérios de parada;
- técnicas de reprodução (substituição da população).

É possível descrever o algoritmo genético como um processo contínuo, que repete ciclos de evolução controlados por um critério de parada, como mostra a figura 3.2 (ALMEIDA 2001).

Os componentes apresentados na figura 3.2 são descritos a seguir.

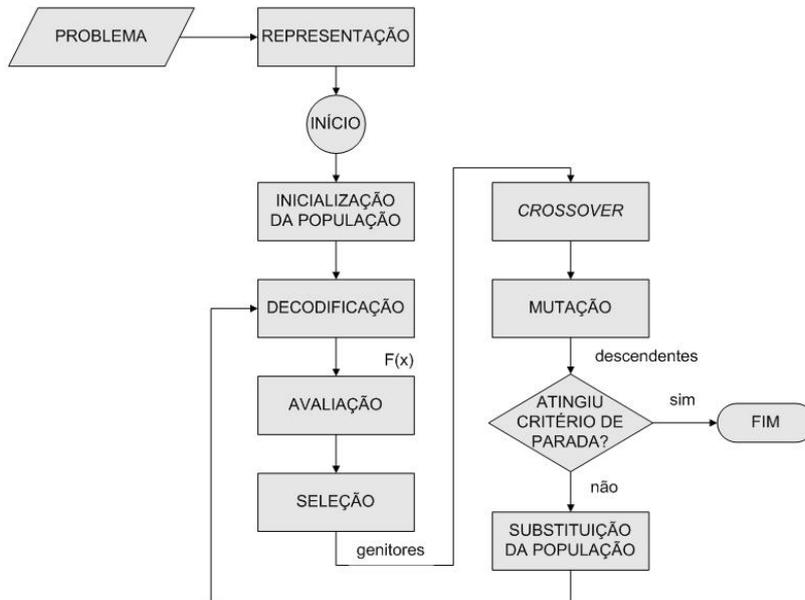


FIGURA 3.2: Ciclo de operações dos Algoritmos Genéticos

Problema: aplicam-se algoritmos genéticos particularmente em problemas complexos de otimização, como por exemplo, problemas com diversos parâmetros ou características que precisam ser combinadas em busca da melhor solução; problemas com muitas restrições ou condições difíceis de se representar matematicamente e problemas com espaços de busca grandes.

Segundo (MICHALEWICZ 1996), a aplicação de algoritmos genéticos em problemas de otimização é diversificada. Existem modelos aplicados à otimização de funções matemáticas, à otimização combinatorial, à otimização de planejamento, ao problema do caixeiro viajante e à otimização da rota de veículos, entre outros.

Representação: define a estrutura do cromossomo a ser manipulado pelo algoritmo. A representação do cromossomo depende, essencialmente do tipo de problema. Os principais tipos de representação são apresentados na tabela 3.1.

TABELA 3.1: Principais Tipos de Representação em Algoritmos Genéticos

REPRESENTAÇÃO	TIPO DE PROBLEMA
Binária	Numéricos, Inteiros
Real	Numéricos
Permutação de Símbolos	Baseados em Ordem
Símbolos Repetidos	Grupamento

Decodificação: consiste basicamente na construção da solução real do problema, a partir do cromossomo. O processo de decodificação constrói a solução a ser avaliada pelo problema.

Avaliação: é o elo entre o algoritmo genético e o mundo externo (PACHECO et al. 1999). A avaliação ocorre através de uma função capaz de representar o problema e tem por objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo na população corrente, guiando o processo de busca.

Seleção: responsável por escolher os indivíduos para a reprodução, baseia-se na aptidão dos indivíduos. A técnica de seleção mais usada em algoritmos genéticos é implementada por uma roleta, onde cada indivíduo é representado por uma fatia proporcional a sua aptidão relativa (ALMEIDA 2001).

Operadores Genéticos: indivíduos selecionados são recombinados ou modificados através dos operadores de *crossover* e de mutação, respectivamente. A performance dos algoritmos genéticos é fortemente dependente do desempenho dos operadores genéticos (GEN & CHENG 1996).

Inicialização da População: determina o processo de criação dos indivíduos para o primeiro ciclo do algoritmo. Tipicamente, a população inicial forma-se a partir de indivíduos criados aleatoriamente. Populações iniciais aleatórias podem ser semeadas com bons cromossomos para uma evolução mais rápida, quando se conhece, *a priori* o valor de boas “sementes”.

Parâmetros de Execução: são responsáveis pelo controle do processo evolucionário e classificados em:

- tamanho da população: indica o número de indivíduos de cada população, ou seja, o número de pontos do espaço de busca;
- taxa de *crossover*: probabilidade de recombinação entre indivíduos;
- taxa de mutação: probabilidade de cada gene do cromossomo sofrer modificação;
- número de gerações: total de ciclos de evolução de um algoritmo genético;

- total de indivíduos: número total de tentativas (tamanho da população x número de gerações);

Critérios de Parada: definem o momento de finalização da execução do GA. Os critérios de parada mais comumente utilizados são o número de gerações e total de indivíduos.

Técnicas de reprodução: determinam o critério de substituição dos indivíduos de uma população para a próxima geração. Os métodos mais utilizados são:

- troca de toda a população: a cada geração N (número de indivíduos na população) indivíduos novos são criados e substituem seus genitores na geração seguinte;
- troca de toda a população com elitismo: todos os cromossomos são substituídos, sendo o mais apto da população corrente copiado para a população seguinte;
- troca parcial da população (*steady-state*): gera M indivíduos ($M < N$), que substituem os piores indivíduos da população atual;
- troca parcial da população sem duplicados: não permite a presença de indivíduos duplicados na população.

3.2 Algoritmos Genéticos na Solução de Problemas de *Scheduling*

A atividade de *scheduling* é economicamente muito importante, mas ainda muito difícil de ser resolvida computacionalmente. Devido a sua grande relevância prática, pesquisas nessa área encontram-se permanentemente ativas.

Ultimamente, muito esforço foi gasto com o objetivo de investigar a aplicação de técnicas evolucionárias a problemas de *scheduling* e a principal dificuldade encontrada consiste em especificar uma representação apropriada para *schedules* viáveis (BÄCK et al. 1997).

A qualidade do *scheduling* é medida através de uma função objetivo que associa um valor numérico à programação (BÄCK et al. 1997). As medidas de desempenho

mais comuns em problemas de programação são: o nível de utilização dos recursos (ocupação percentual), o percentual de tarefas atrasadas, o atraso médio ou máximo para um conjunto de tarefas e o tempo de fluxo (médio ou máximo) para um conjunto de tarefas (*makespan*). Normalmente, mais de uma medida de desempenho é relevante para uma aplicação em particular e, nesse caso, torna-se necessária a combinação de objetivos (algumas vezes conflitantes), como por exemplo, a minimização do consumo de energia elétrica e a maximização da utilização de recursos. Assim, pode-se perceber que problemas de *scheduling* envolvem, em geral, a otimização de múltiplos objetivos. Em resumo, o objetivo final da otimização de problemas de *scheduling* é a construção de um horizonte de programação completo e viável, que minimize ou maximize os vários critérios desejados (SIMÃO 2004).

Com exceção de alguns casos teóricos, de pouca relevância prática, o processo de determinação de uma solução ótima para um problema de programação pertence à classe de problemas *NP-hard*, ou seja, problemas para os quais não existe ainda algoritmo determinístico conhecido que os resolva em tempo polinomial. Na abordagem de problemas reais, onde além da complexidade combinatória, deve-se lidar também com diferentes tipos de restrições específicas, impostas por detalhes particulares do problema, a otimização torna-se ainda mais difícil. A programação de produção pode, então, ser descrita como um problema complexo de satisfação de restrições (BÄCK et al. 1997).

A representação adequada para problemas de *scheduling* ainda é apontada como limitação por grande parte das abordagens evolucionárias para casos reais (SIMÃO 2004). No entanto, (MICHALEWICZ 1996) afirma que técnicas evolucionárias não contam apenas com funções de penalidade, descarte e correção de soluções inviáveis para tratar as restrições do problema e apresenta várias opções de manipulação das restrições do problema, ao se utilizar este tipo de técnica.

Em problemas de seqüenciamento, a representação das soluções e a decodificação do cromossomo são componentes fundamentais para o sucesso da utilização de algoritmos genéticos como técnica de solução. Existem dois tipos de representação de soluções: direta e indireta (MICHALEWICZ 1996). Na representação direta, o seqüenciamento das atividades é totalmente codificado pelos cromossomos e o trabalho de decodificação é praticamente inexistente, pois os cromossomos são soluções do problema, ou seja,

neste caso o cromossomo é o próprio *schedule* e o algoritmo genético evolui estes cromossomos para uma solução melhor. Na representação indireta, o cromossomo é codificado como uma seqüência de regras que indicam as tarefas e não o *schedule* em si, o algoritmo genético evolui esses cromossomos para encontrar uma seqüência melhor de regras (CHENG, GEN & TSUJIMURA 1996). Neste tipo de representação a transformação do cromossomo numa solução viável requer a construção de um decodificador especialmente para o problema. A representação indireta pode ainda ser subdividida em: indireta específica ao problema e indireta independente do domínio.

A representação indireta independente do domínio não possui nenhuma informação auxiliar a respeito do problema. O algoritmo evolucionário reproduz cegamente a solução codificada ao aplicar operadores convencionais e o conhecimento do domínio permanece separado, inserido no procedimento de avaliação, para o cálculo da aptidão. Enquanto que na representação indireta específica ao problema, o conhecimento do problema encontra-se representado nos indivíduos. A utilização desta representação exige a criação de novos operadores, dependentes do domínio do problema, sendo portanto necessária a utilização de um decodificador capaz de gerar soluções viáveis a partir dos indivíduos. Verifica-se também a necessidade do conhecimento do domínio do problema na representação, nos operadores e na função de avaliação.

Os problemas investigados até o momento são, em grande parte, versões simplificadas de problemas de programação do mundo real, como por exemplo, problemas do tipo *flow-shop*, *job-shop* e problemas de uma máquina. Esses tipos de problema foram abordados com sucesso por estruturas de representação indiretas independente do domínio (BÄCK et al. 1997). Problemas do mundo real foram abordados por (CRUZ 2003) e (ALMEIDA 2001) e são considerados mais complexos, pela necessidade de lidar com tipos adicionais de restrições.

Capítulo 4

Programação de Produção em Refinaria de Petróleo

4.1 Introdução

Refinarias de petróleo constituem o mais importante exemplo de plantas contínuas multiproduto, ou seja, um sistema de processamento contínuo gerador de múltiplos produtos (MORO 2000). Em geral, uma refinaria processa um ou mais tipos de petróleo e produz uma série de produtos derivados, como o gás liquefeito de petróleo (GLP), a nafta, a gasolina, o querosene, o óleo diesel e o óleo combustível.

Conforme comentado no capítulo 1, o planejamento em refinarias pode ser classificado em três níveis: estratégico, tático e operacional, dependendo das decisões envolvidas e do horizonte de tempo considerado (AIRES 2005).

A figura 4.1¹ mostra um esquema simplificado da divisão do controle da produção de uma refinaria nos níveis de tomada de decisão citados acima.

A programação de curto prazo é responsável pela desagregação de informações, traduzindo as metas do planejamento para a operação. Sendo assim, a programação tem grande importância neste processo, pois representa o elo entre o planejamento e a operação.

O problema de *scheduling* concentra-se na definição de detalhes como: descarregamento de navios petroleiros, alocação do petróleo recebido nos tanques do terminal,

¹Fonte: (SIMÃO 2004) adaptado

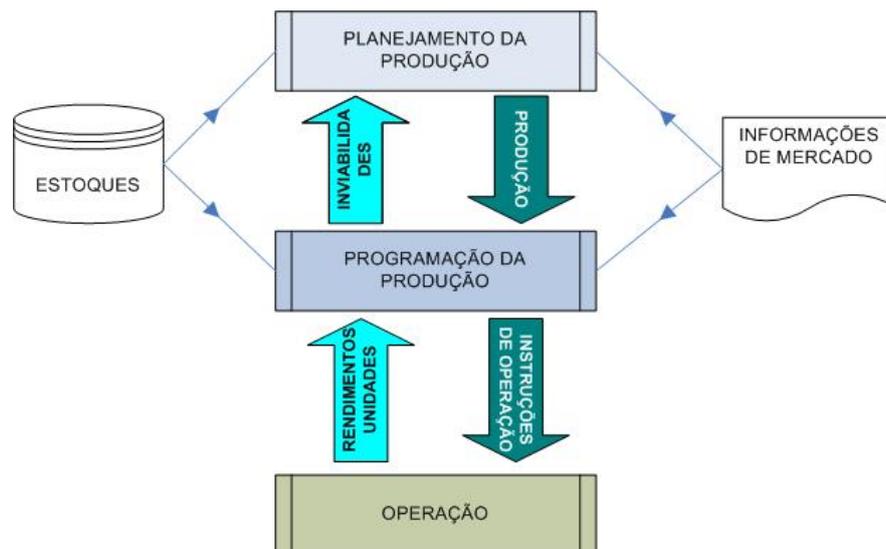


FIGURA 4.1: Fluxo de Informações entre Planejamento, Programação e Operação

alocação de tanques da refinaria para recebimento do óleo cru, alocação de tanques para produtos processados, atendimento ao balanço material da refinaria e programação das parcelas de petróleo a serem movimentadas através do oleoduto (SHAH 1996).

Conforme mencionado anteriormente, técnicas de programação matemática para o planejamento de longo prazo têm sido extensivamente estudadas e implementadas, mas poucos trabalhos fazem referência às atividades de curto prazo. Sendo assim, a solução desses problemas, nos quais vários detalhes operacionais são considerados, recebem normalmente tratamento manual, devido à falta de sistemas de apoio que forneçam respostas em tempos computacionais aceitáveis (AIRES 2005). Este “*gap*” que existe entre o planejamento otimizado, mas estático e de longo prazo (que normalmente usa técnicas de programação linear) e as operações a serem executadas na realidade dinâmica da planta é destacado por (CUTTING & HAVERLY 1995), cujas observações apontam para investimentos recentes em sistemas computacionais, inicialmente voltados a aplicações para a atividade de planejamento de produção e em sistemas de controle de planta.

Nos últimos vinte anos, a implantação de sistemas de controle avançado em refinarias proporcionou incrementos de produção significativos nas unidades de processo. O aumento de produtividade resultante gerou interesse por sistemas capazes de considerar objetivos de produção mais complexos. Dessa forma, o investimento para criação de aplicações de tecnologia digital ao processo de programação de produção de refinarias

de petróleo começou a ser mais significativo a partir da década de 90 (MORO 2000).

4.2 Ambiente Operacional

Este capítulo tem como objetivo descrever o ambiente operacional considerado neste estudo, cujo cenário envolve um terminal (Terminal Osório Dutra - TEDUT), localizado na cidade de Osório (RS), uma refinaria (Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP S.A.), localizada em Canoas (RS) e um oleoduto (OSCAN), por onde é realizada a transferência de petróleo do terminal para a refinaria. A distância entre o terminal e a refinaria é de aproximadamente cem quilômetros e a figura 4.2 apresenta a disposição de ambos no mapa do Rio Grande do Sul.

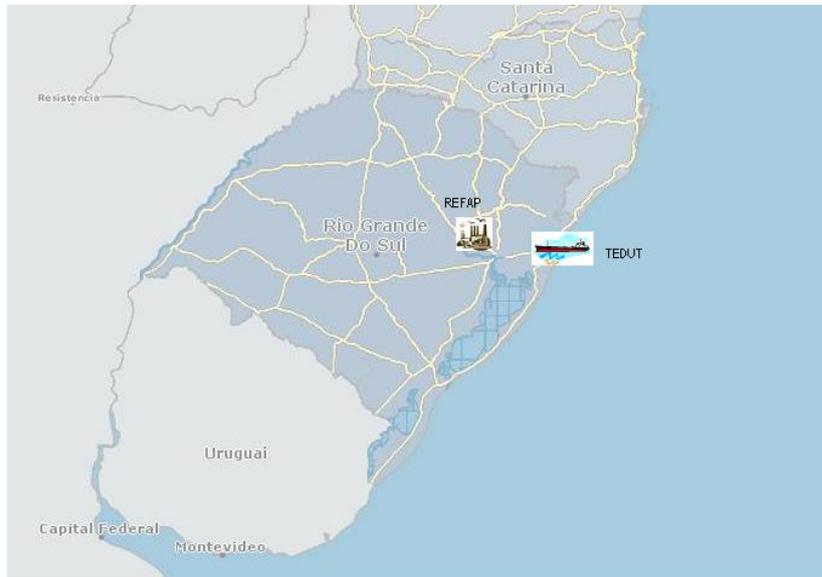


FIGURA 4.2: Localização no Mapa do Rio Grande do Sul

Alguns conceitos, aproximações e regras operacionais serão descritos também neste capítulo, buscando a contextualização e familiarização com o problema descrito no trabalho.

4.2.1 Conceitos e Definições

Essa seção tem como objetivo introduzir alguns conceitos e definições que serão utilizados ao longo da dissertação e consistem de informações fundamentais para o entendimento do trabalho desenvolvido.

Item de cru: volume de óleo cru bombeado de um tanque do terminal para um tanque da refinaria através do duto.

Lista de crus: descrição dos petróleos componentes de um tanque;

Lote: volume de óleo cru a ser descarregado do navio petroleiro para um tanque do terminal.

Tanque pulmão: tanque capaz de receber e enviar simultaneamente.

Campanha: modo de operação da unidade de processamento, onde são estipulados rendimentos e matérias-primas específicas para a obtenção de produtos.

Corrente: qualquer componente que entra ou sai de um equipamento, ou seja, qualquer material que é movimentado entre as unidades de processamento.

Carga: material que entra na unidade de processamento. A carga da unidade de destilação é o óleo cru.

Plano de produção: resultado da análise econômica produzido pela aplicação local de *planning*, com a definição do elenco de petróleos e da vazão de carga das unidades de processamento.

Programação de Produção - *Schedule*: desmembramento do Plano de Produção em operações viáveis.

Densidade API: unidade de medida tipicamente usada na caracterização de petróleo e derivados, calculada em função da densidade, segundo a equação 4.1.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{d_{60/60^{\circ}F}} - 131,5 \quad (4.1)$$

Serviço de tanque: descreve o tipo de cru armazenado no tanque.

4.2.2 Panorama Geral

A REFAP é uma refinaria de porte médio, com capacidade de processamento de 189 mil barris de óleo por dia (30.000 m³/dia) e com um esquema de refino de média

complexidade. Como unidades principais de processamento na REFAP podemos citar: duas unidades de destilação atmosférica (U-01 e U-50), uma unidade de destilação a vácuo (U-02), uma unidade de craqueamento catalítico fluido (U-03), uma unidade de craqueamento catalítico fluido de resíduo (URFCC), uma unidade de hidrotratamento de diesel (UHDT) e uma unidade de coqueamento retardado (UCR).

A figura 4.3 apresenta, de maneira simplificada, o esquema de refino da REFAP. Os principais produtos dessa refinaria são: gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, óleo diesel, nafta petroquímica, querosene de aviação (QAV), asfalto, óleo combustível e solventes; sendo a comercialização de nafta petroquímica e de diesel os negócios mais importantes da refinaria.

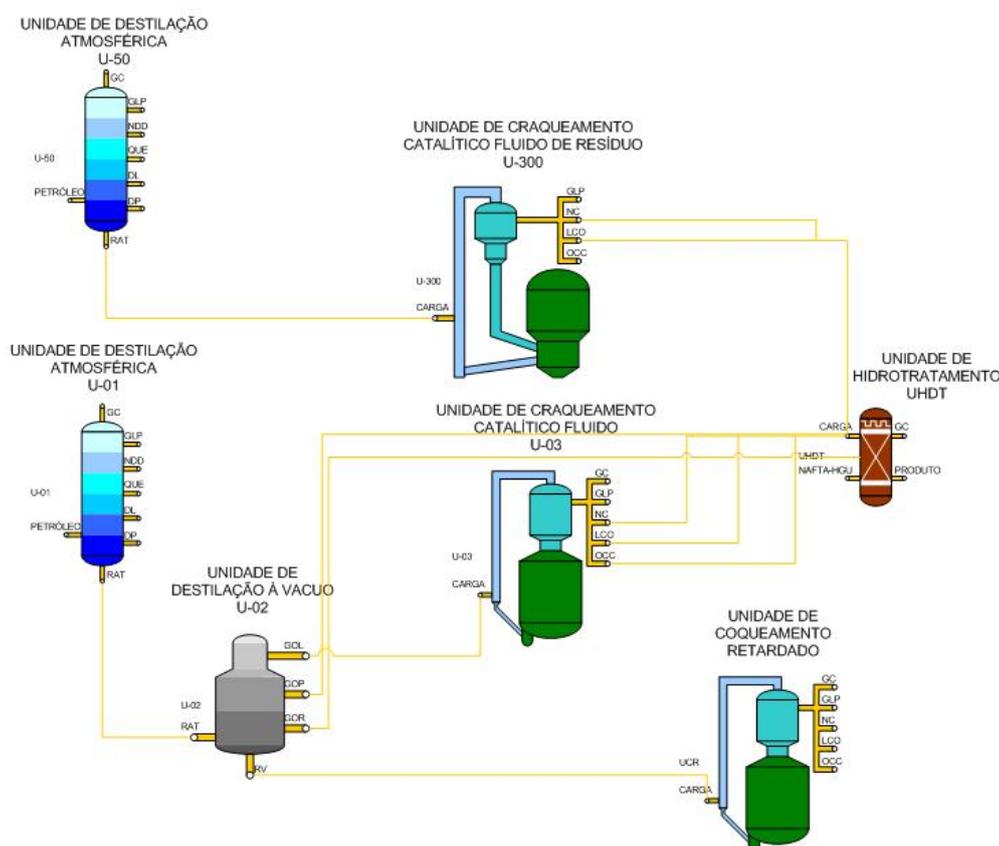


FIGURA 4.3: Esquema de Refino Simplificado - REFAP

O suprimento de petróleo para a refinaria é realizado através de navios petroleiros, que descarregam próximo ao TEDUT. As operações realizadas são as de amarração do navio (uma vez que não há porto para atracação, devido às condições instáveis de mar naquela região) e de descarregamento, via monobóia e linhas submarinas, para

os tanques do TEDUT. Dos tanques do terminal, o óleo cru é bombeado para a área de estocagem da refinaria através de um duto (OSCAN) de 22 polegadas, por cem quilômetros de extensão. Uma vez na REFAP, o cru será processado nas duas unidades de destilação e, posteriormente, nas demais unidades.

O subsistema mais crítico para a programação de produção da REFAP é o de óleo cru, o qual deve garantir o não atraso de entrega de óleo e níveis seguros de estoque no terminal e na refinaria.

A figura 4.4 mostra de maneira esquemática os elementos que compõem o “subsistema” de recebimento e programação de petróleo, descrito no parágrafo acima e detalhado mais tarde nos capítulos 5 e 6 desta dissertação.

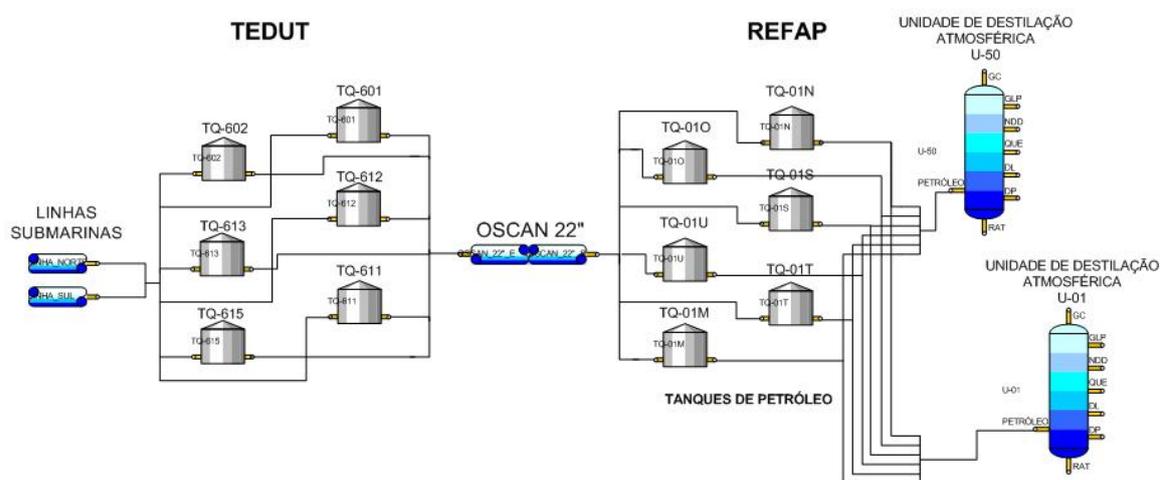


FIGURA 4.4: Subsistema de Óleo Cru

No terminal existem seis tanques destinados ao armazenamento de petróleo e o mesmo número encontra-se disponível na área de estocagem de cru da refinaria. As capacidades dos tanques variam de acordo com a tabela 4.1.

TABELA 4.1: Identificação e Capacidade dos Tanques (TEDUT e REFAP)

TEDUT	CAPACIDADE (m ³)	REFAP	CAPACIDADE (m ³)
TQ601	38.500	TQ01S	65.000
TQ602	38.500	TQ01U	65.000
TQ611	55.000	TQ01N	66.500
TQ612	63.500	TQ01O	38.800
TQ613	63.500	TQ01T	65.000
TQ615	63.500	TQ01X	48.000

Existe um conjunto de petróleos que pode ser processado pela REFAP, em função de algumas características, como: densidade ($^{\circ}$ API), teor de enxofre, rendimento de derivados, teor de metais e características do resíduo atmosférico (RAT). Algumas propriedades do RAT devem ser consideradas quando se trata de processamento na U-50, cujo resíduo é carga da U-300 (unidade de craqueamento catalítico de resíduo). Os crus processados na REFAP podem ser agrupados em quatro tipos, de acordo com suas características químicas e físicas (MAGALHÃES 2004), conforme apresentado na tabela 4.2.

TABELA 4.2: Famílias de Petróleos Processados na REFAP

SIGLA	DESCRIÇÃO
BTE	Baixo teor de enxofre
RAT	Resíduo atmosférico craqueável
ASF	Características boas para asfalto
CND	Condensado

As características do óleo cru são extremamente importantes para assegurar o bom rendimento da planta e a qualidade dos produtos. Atualmente o volume de petróleo processado na REFAP é 70% nacional e 30% importado. A tabela 4.3 lista as características dos principais petróleos usados na refinaria. Por questões de segurança da informação, os petróleos encontram-se referenciados por siglas.

TABELA 4.3: Petróleos Processados na REFAP

PETRÓLEO	FAMÍLIA	TIPO	$^{\circ}$API	% ENXOFRE
AB31	ASF	Nacional	28,3	0,44
ABCL	ASF	Nacional	20,0	0,59
MR32	MRL	Nacional	19,6	0,67
MR33	MRL	Nacional	19,9	0,74
RCBR	RAT	Nacional	28,3	0,58
ESCR	BTE	Importado	33,5	0,17
SABL	CND / RAT	Importado	45,8	0,10
GIRA	BTE	Importado	31,1	0,36
NKOS	CND	Importado	48,4	0,06
PENL	RAT	Importado	34,9	0,08
BONL	BTE	Importado	34,5	0,14

Após ser recebido na refinaria, o cru deve permanecer no tanque por um período de vinte e quatro horas (tempo de preparo de tanque), a fim de separar a água salgada do

óleo antes da entrada da unidade de destilação. As correntes produzidas nas unidades de destilação atmosférica são: GLP, nafta leve de destilação direta (NL), nafta pesada de destilação direta (NP), querosene (K), diesel leve (DL), diesel pesado (DP) e resíduo atmosférico (RAT). O RAT da unidade U-01 é enviado para a unidade de destilação a vácuo (U-02), que produz três correntes: gasóleo leve (GOL), gasóleo de vácuo (GOV) e resíduo de vácuo (RV). O gasóleo de vácuo alimenta a unidade de craqueamento catalítico fluido (U-03) e o resíduo de vácuo é enviado para a unidade de coqueamento retardado (UCR). O RAT da U-50 é carga da unidade de craqueamento catalítico fluido de resíduo (U-300).

4.2.3 Programação de Petróleos

Tipicamente o *scheduling* de petróleo deve garantir o suprimento contínuo do óleo adequado à carga da unidade de destilação, obedecendo as metas definidas no planejamento da produção. As principais restrições para essa atividade estão ligadas à chegada do navio ao porto ou terminal, à disponibilidade de berço para atracação e de tanques para estocagem no terminal, à disponibilidade do oleoduto para movimentação do óleo e à capacidade de tancagem na refinaria (SHAH 1996).

O recebimento de petróleo na refinaria acontece, normalmente, através de um oleoduto, que interliga esta com um terminal de recebimento de navios petroleiros (como acontece entre a REFAP e o TEDUT). A programação de recebimento do óleo cru possui alguma rigidez do ponto de vista da refinaria, uma vez que a mesma está ligada ao desempenho de campos produtores e/ou a contratos de fornecimento.

O petróleo recebido possui características específicas que o tornam adequado a finalidades diversas. Por isso, o seu processamento deve obedecer a restrições de quantidade e de qualidade que considerem aspectos de mercado e de operação. Um exemplo clássico de característica capaz de influenciar o resultado do processamento é o teor de enxofre, que pode até impossibilitar a produção de alguns tipos de derivados. Enquanto características como o °API e o teor de enxofre podem impor restrições operacionais.

Caso a qualidade de um óleo em um determinado tanque não atenda às condições operacionais da unidade de destilação ou às exigências da campanha a ser programada, é necessário processá-lo simultaneamente com óleo de outro tanque, que forneça

juntamente com o anterior uma mistura de óleos compatível com a unidade e com a campanha a ser realizada. Vale ressaltar que é extremamente importante a alimentação das unidades de destilação atmosférica com uma vazão de óleo o mais próxima possível do valor definido pelo plano de produção, a fim de maximizar a produção e, conseqüentemente, o lucro. Outro fator imperativo para o funcionamento das unidades é a alimentação contínua, uma vez que paradas não programadas são custosas.

Segundo (MORO 2000), na prática é possível transferir óleo entre tanques, embora tais operações sejam raramente realizadas, pois tratam-se de tarefas demoradas, podem gerar contaminações, ocupam dois ou mais recursos por um longo período de tempo e envolvem manobras operacionais mais complexas do que misturar correntes oriundas de dois ou mais tanques diretamente na carga da unidade de destilação.

A negociação da carga e a programação de descarregamento dos navios petroleiros é realizada em função do resultado do planejamento de produção. Assim, para um dado horizonte de programação, o número, o tipo, o instante de início e de fim de cada batelada de cru (itens) são conhecidos *a priori*.

Capítulo 5

Modelo de Algoritmo Genético Proposto para o Problema de *Scheduling* de Refinaria

O modelo evolucionário proposto para a solução deste problema é formado por uma espécie composta por três segmentos, onde o primeiro segmento decide a tarefa a ser programada e os demais indicam quais recursos serão utilizados pela tarefa.

A representação utilizada no indivíduo, bem como as demais características do modelo, serão vistas ao longo deste capítulo.

5.1 Descrição da Operação dos Elementos do Modelo

Esta seção apresenta as principais considerações e questões operacionais da planta relevantes para o desenvolvimento dos modelos.

5.1.1 Operação de Tanques

A operação pulmão tanto nos tanques do TEDUT quanto nos da REFAP é possível, no entanto, deve ser evitada principalmente por razões contábeis (no caso do terminal) e de contaminação da corrente de carga da unidade de destilação (no caso da refinaria). Sendo assim, todos os tanques de cru do terminal e da refinaria assumem apenas três estados: recebendo, bombeando ou ocioso. O envio de petróleo para o terminal

ocorre através de duas linhas submarinas e é permitido que um mesmo tanque receba simultaneamente das duas linhas submarinas.

(MAGALHÃES 2004) considera o conceito de serviço para todos os tanques do terminal e da refinaria, como mostra a tabela 5.1 e assume que os tanques não mudam de serviço ao longo do horizonte de programação.

TABELA 5.1: Serviços de Tanques de Petróleo

TEDUT	REFAP	TIPO DE CRU
TQ601	TQ01S	BTE
TQ602	TQ01U	ASF
TQ611	TQ01N	RAT
TQ612	TQ01O	RAT
TQ613	TQ01T	BTE
TQ615	TQ01X	BTE

A presente pesquisa abandona o conceito de “serviço de tanque”, uma vez que se trata de uma heurística utilizada pela equipe de operação da refinaria para facilitar o gerenciamento e as decisões sobre as operações efetuadas com os petróleos. Além disso, entende-se que esta aproximação poderia representar uma limitação ao potencial do modelo evolutivo, impactando na geração de melhores resultados para a programação de petróleos.

Por outro lado, são feitas considerações com relação à mistura de petróleos durante as operações de recebimento:

- petróleos com diferença de $^{\circ}$ API maior que dez unidades não podem ser misturados em um mesmo tanque;
- admite-se mistura perfeita de crus nos tanques.

5.1.2 Operação do Oleoduto

Esta seção dedica-se às aproximações mais relevantes para as operações do OSCAN. Assume-se que o oleoduto é um dispositivo de volume fixo (23.000 m³), através do qual flui uma fila de lista de crus, de modo que:

- o fluxo é sempre unidirecional, do terminal para a refinaria, em um padrão *FIFO* (*First In First Out*). Ou seja, durante a operação normal, as parcelas que entram

no duto deslocam as que saem;

- é assumida para vazão média de escoamento no duto o valor de 1.000 m³/hora, apesar de, na prática, este valor variar em função do tipo de petróleo bombeado e do horário de pico de consumo de energia;
- o lote mínimo de transferência de cru no oleoduto é de 5.000 m³. Esta determinação como objetivo, gerar uma estimativa do tamanho do indivíduo utilizado no modelo (a ser detalhado na seção 5.2);
- podem ocorrer interrupções durante a operação normal do oleoduto. Neste caso, a fila de crus permanece na mesma posição do momento da parada (figura 5.1);

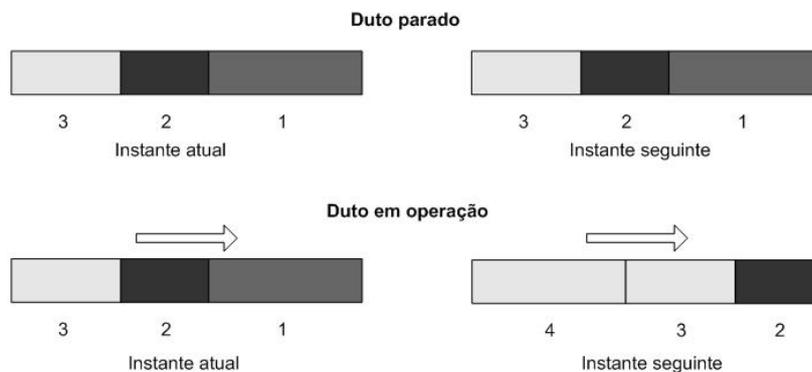


FIGURA 5.1: Operação do Duto

5.1.3 Descarga de Navios

(MAGALHÃES 2004) considerou que o descarregamento de navios é realizado para tanque(s) do terminal cujo serviço pertence à mesma família do cru recebido e que, caso esta opção seja inviável ou indesejável, o cru descarregado pode ser “degradado” para outro tanque em dada ordem preferencial de famílias. A degradação definida em (MAGALHÃES 2004) consiste em permitir que determinado tipo de óleo seja “convertido” em outro, de acordo com as regras de “prioridade” previamente estipuladas. Em geral, a operação de degradação implica que um tipo de petróleo mais nobre é estocado em um tanque destinado a tipos de um menor valor agregado.

O conceito de “família de petróleos” não é considerado para as movimentações de cru entre navio e terminal, pelos mesmos motivos expostos na seção 5.1.1, na qual

o conceito de “serviço de tanque” foi desconsiderado. O lote mínimo de transferência entre navio e terminal considerado neste modelo é de 7.000 m³ e as exigências quanto às regras de mistura são obedecidas.

Informações sobre datas de chegada de navios (ETA - *Expected Time Arrival*) e volume, tipo e características do petróleo a ser recebido são conhecidas *a priori*.

5.1.3.1 Linhas Submarinas

O subsistema de descarga de petróleo possui duas linhas submarinas (Norte e Sul), com capacidade de 7.000 m³ cada, através das quais os petróleos são descarregados. O descarregamento pode ser efetuado em vazão baixa (3.000 m³/h) ou alta (6.000 m³/h), dependendo do número de linhas utilizadas.

Em geral, utilizam-se ambas as linhas e o tempo disponível para o descarregamento do navio é de trinta horas a partir do início da operação. Operações mais demoradas incorrem em multas altas, denominadas custos de sobreestadia. Por outro lado, algumas informações subjetivas podem ser consideradas, como por exemplo: deliberação, por parte do programador, de estocar determinado cru para uso futuro. Tais escolhas são razões motivadoras para se manter esse tipo de decisão fora do escopo de qualquer modelo.

Uma operação denominada “deslocamento de linha” ocorre quando o cru estocado inicialmente na linha (estoque no início da operação de descarga) não é o mesmo tipo de petróleo a ser descarregado. Nesse caso, o conteúdo da linha submarina é descarregado em um tanque adequado até que o estoque de 7.000 m³ da linha seja inteiramente renovado com o cru do navio. (MAGALHÃES 2004) considera que quando este tipo de operação é solicitada, caso não haja tanque adequado disponível, pode haver degradação do volume de cru armazenado na linha para um tanque conveniente.

Particularmente nos casos de descarregamento de navio pelas duas linhas submarinas o modelo deverá tomar as seguintes decisões:

- designar um único tanque para descarregar os estoques das linhas simultaneamente, quando as mesmas armazenam inicialmente o mesmo tipo de cru;
- designar dois tanques diferentes, um para cada linha, para descarga simultânea, nos casos em que as mesmas armazenam inicialmente tipos diferentes de cru;

- designar um único tanque para descarregamento do conteúdo do navio ao término da fase de “deslocamento de linha”.

5.1.4 Tanques de Carga

Tanque de carga é a denominação para os tanques de armazenamento de petróleo que alimentam as unidades de destilação atmosférica.

O modelo deve obedecer as seguintes regras com relação às operações com tanques de carga:

Tempo de preparo: todo tanque de cru na refinaria deve permanecer em “repouso” por no mínimo vinte e quatro horas após o recebimento de um item de cru, antes de servir de carga para a UDA. Esse procedimento simples, seguido pela remoção de uma emulsão adicional de salmoura no óleo, tem grande importância pois evita deterioração ou outros problemas operacionais para as torres de destilação.

Tanques principal e auxiliar: uma UDA deve sempre ser alimentada por pelo menos um tanque. Dependendo da campanha, a unidade pode ser alimentada por um tanque principal (obrigatório) e um tanque auxiliar (opcional), também chamado de “tanque de injeção”. O tanque principal provê a UDA com o tipo de cru mais representativo da campanha em operação. O tanque auxiliar, por sua vez, complementa a carga, de forma a ajustar a vazão ou a composição da carga.

Tempo mínimo de carga: uma vez iniciada a carga, por um ou mais tanques, na unidade de destilação, o(s) tanque(s) designado(s) deve(m) permanecer em carga por um período mínimo, determinado normalmente como 48 horas. O objetivo nesse caso é evitar trocas desnecessárias de tanques, que resultam em perturbações indesejadas nas colunas de destilação e em outros equipamentos, impondo um esforço desnecessário aos sistemas de controle.

5.1.5 Limites de Composição de Carga da UDA

Cada tanque de petróleo possui, em geral, uma mistura de crus e não um único petróleo. Em função do esquema de refino e da configuração das unidades de processamento, existem restrições de operação para determinados óleos. A premissa utilizada

neste modelo para a restrição de composição de óleos na carga das unidades de destilação foi a mesma apresentada em (MAGALHÃES 2004) e encontra-se descrita na tabela 5.2.

TABELA 5.2: Limites de composição de entrada das UDAs

COMPONENTE	U-01	U-50
MRL (%)	42	40
CND (%)	35	40

As siglas MRL e CND correspondem aos petróleos limitantes.

5.1.6 Modo Operacional das Unidades de Destilação

Unidades de processamento em uma refinaria são projetadas para operação contínua. O modo de operação (ou campanha) das unidades de processamento é definido na etapa de planejamento da produção, através da geração do plano de produção, o qual define os volumes a serem processados em cada unidade.

Como descrito nas seções 1.2 e 1.3, apenas a programação de petróleos está sendo considerada nesta pesquisa e os equipamentos envolvidos nesse processo são: o(s) navio(s) de petróleo, os tanques do terminal, o oleoduto que faz a movimentação do cru entre o terminal e a refinaria, os tanques de carga (refinaria) e as unidades de destilação. Neste modelo, as UDAs são consideradas “sumidouros”, ou seja, a carga entra na unidade, mas não há geração de frações de destilação. O objetivo visado nas unidades de destilação é o atendimento ao volume planejado, com a qualidade requerida pela campanha.

As campanhas das UDAs foram modeladas em função das qualidades do tipo de cru demandado pela unidade. A tabela 5.3 mostra as possíveis campanhas de processamento por UDA.

TABELA 5.3: Possíveis Campanhas por UDA

CAMPANHA	API	% ENXOFRE	U-01	U-50
BTE	34.5	0.14	x	x
RAT	39.5	0.08		x
ASF	28.3	0.44	x	

5.2 Representação

5.2.1 Representação dos Indivíduos

A especificação de uma representação apropriada para um problema de *scheduling* interfere fundamentalmente no desempenho de um algoritmo genético. A literatura correspondente apresenta representações que variam de simples *strings* a complexas estruturas de dados, conseqüentemente, os operadores empregados variam também dos mais simples até algoritmos complexos baseados no conhecimento específico do problema.

As representações independentes do domínio parecem ser especialmente apropriadas para problemas de *scheduling* com poucas restrições e estrutura razoavelmente simples. Particularmente, problemas de *flow-shop* foram abordados com sucesso através da representação por seqüência de tarefas.

A representação adotada neste modelo define um cromossomo que possui três segmentos distintos, um segmento de tarefas e dois segmentos de recursos, conforme ilustrado esquematicamente na figura 5.2. O segmento de tarefas (S_T) é uma lista que determina a ordem na qual as tarefas devem ser programadas, onde cada gene representa um tipo de tarefa (descarga de navio, transferência em oleoduto, carga da unidade U-01 e carga da U-50). O tamanho de S_T é fixo em relação a um dado planejamento e pode ser determinado pela equação 5.1.

$$N = \frac{V_{des}}{L_{des}} + \frac{V_{des} + V_{ter}}{L_{trn}} + \frac{T_{U1} + T_{U2}}{T_{min}} \quad (5.1)$$

- N representa o tamanho do cromossomo;
- V_{des} representa o volume total a ser descarregado pelo(s) navio(s);
- L_{des} corresponde ao volume dos lotes para as tarefas de descarga;
- V_{ter} representa o somatório dos volumes de cru armazenados nos tanques do terminal;
- L_{trn} corresponde ao volume dos lotes para as tarefas de transferência entre o terminal e a refinaria (volume transferido através do OSCAN);

- T_{U1} e T_{U2} representam o tempo total referente ao volume de cru planejado para o horizonte de programação, nas unidades U-01 e U-50, respectivamente;
- T_{min} representa o tempo mínimo de carga dos tanques da refinaria.

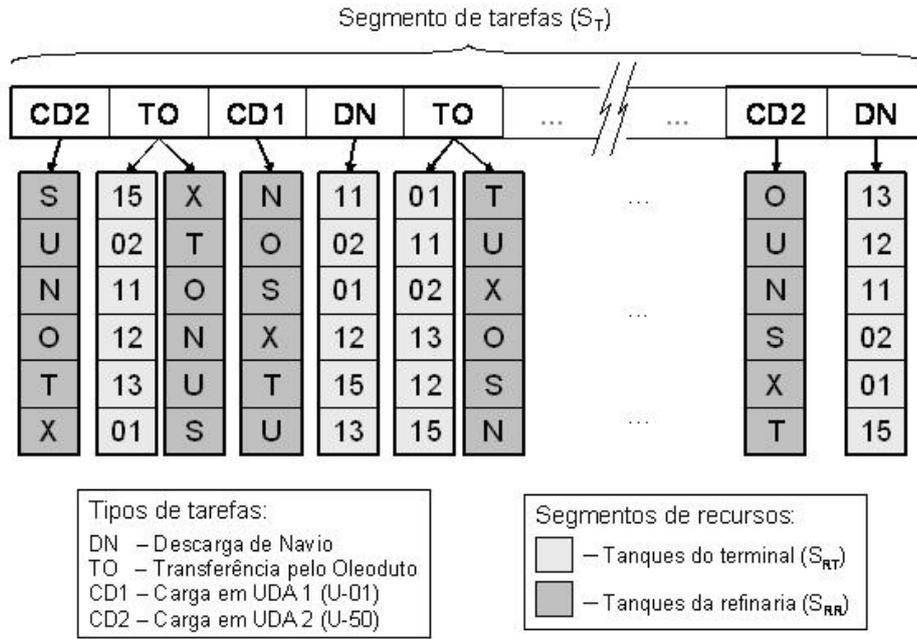


FIGURA 5.2: Esquema de Representação do Indivíduo (Cromossomo)

A equação 5.1 é constituída pela soma de todas as tarefas a serem programadas, onde cada uma das três parcelas da soma representa um tipo de tarefa: a primeira corresponde ao descarregamento do navio, a segunda parcela está relacionada com a transferência entre terminal e refinaria e a terceira com a carga da unidade de destilação.

Cada gene do segmento S_T possui um ou dois segmentos de recursos (S_R) associado(s) a ele, dependendo do tipo de tarefa. Para cada gene que representa uma tarefa de descarga de navio, existe um único segmento S_R associado a ele (S_{RT}), representando uma lista com os tanques do terminal, que constituem possíveis destinos para tal operação. As tarefas de carga em UDA, representadas nos genes de S_T , também têm um único segmento S_R associado (S_{RR}), com a indicação da lista de tanques da refinaria (possíveis origens de cru para este tipo de tarefa). Finalmente, cada gene de S_T representando uma tarefa de transferência pelo oleoduto tem a ele associado os

dois tipos de segmento de recurso (S_{RT} e S_{RR}), indicando as possíveis origens de cru no terminal e os possíveis destinos, na refinaria. Cada gene dos segmentos de recursos (S_R) correspondem a um tanque do terminal (S_{RT}) ou da refinaria (S_{RR}) e os mesmos encontram-se no segmento em ordem preferencial de alocação de tarefas (definida pelo algoritmo genético).

5.2.2 Representação do Tempo

Em modelos de programação de produção, um aspecto fundamental consiste na representação do domínio do tempo. A abordagem mais comum define intervalos ou “fatias” de tempo para a alocação de tarefas. Numa representação contínua do tempo essas fatias têm comprimento variável; na representação discreta as fatias possuem duração fixa e mesmo comprimento, definido como o máximo divisor comum dos tempos de processamento envolvidos no problema (MORO 2000).

Na abordagem discreta, a duração das fatias de tempo deve ser escolhida de forma que todos os tempos de processamento sejam múltiplos do tempo de duração da tarefa e, dessa forma, todos os eventos ocorrem apenas na fronteira entre dois intervalos. A desvantagem desse tipo de representação encontra-se no seguinte fato: em problemas nos quais existe grande número de intervalos de tempo ou pequenas diferenças entre eles, o máximo divisor comum pode ser muito pequeno, tornando o problema extremamente grande, uma vez que o número de intervalos sobre os quais são definidas as variáveis e as restrições também seria muito grande.

No esquema de representação contínua, o horizonte é dividido em um número fixo de fatias de duração variável, definidas pelo algoritmo de otimização e pela natureza do problema. (MORO 2000) dividiu o horizonte de tempo em um número de subperíodos de duração conhecida, em função dos itens de cru a serem recebidos. Para cada um dos subperíodos, o algoritmo escolhe um número de fatias de tempo de duração variável. Ou seja, o número de fatias de tempo é pré-definido, baseado na duração do subperíodo, entretanto, a duração da fatia de tempo é determinada pelo algoritmo de otimização.

Adotou-se, neste trabalho, como modelo de representação do tempo a divisão das *quantidades* transferidas em cada uma das tarefas, ao invés da discretização do tempo. Para tal, define-se um lote que corresponde ao volume a ser transferido por cada tarefa.

Vale ressaltar que da mesma forma que lotes muito pequenos podem inviabilizar computacionalmente a otimização, lotes muito grandes podem criar cenários sem soluções possíveis. Sendo assim, o conhecimento do problema é bastante relevante no momento da definição dos lotes.

5.3 Decodificação

Conforme mencionado na seção 5.2.1, executa-se a decodificação de cada solução através da leitura seqüencial de todos os genes do segmento S_T e dos genes de seus respectivos segmentos S_R . Cada tarefa contempla um lote por vez e só é programada caso tenha recursos disponíveis para atendê-lo.

5.3.1 Descarga de Navio

Para este tipo de tarefa, a alocação de tanque(s) segue as considerações descritas nas seções 5.1.3 e 5.1.3.1. O algoritmo tenta alocar um único tanque para a descarga do lote atual, seguindo a ordem do respectivo segmento S_R .

A tentativa de alocação de um tanque respeita limitações relativas a diferenças entre densidade dos crus armazenados e do óleo recebido, uma vez que petróleos com °API muito diferentes normalmente não fornecem uma mistura bem homogênea, podendo causar estratificação dos óleos no tanque.

O fluxograma mostrado na figura 5.3 apresenta, de maneira esquemática, a heurística de decodificação de descarregamento de navios.

Uma vez identificada a tarefa de descarga do navio (segmento S_T), inicia-se o processo de decodificação com a leitura do segmento S_R e a heurística para a determinação do tanque de destino ocorre da seguinte maneira:

1. verificação da diferença de °API entre os petróleos armazenados no primeiro tanque selecionado pelo AG e o petróleo que se encontra na saída da linha submarina, de acordo com a regra descrita na seção 5.1.1. O algoritmo percorre os genes do segmento S_R até que seja alocado um tanque que atenda a condição descrita ou até que seu fim seja atingido sem que se tenha conseguido alocar um tanque. Nesse caso, parte-se para o passo 2;

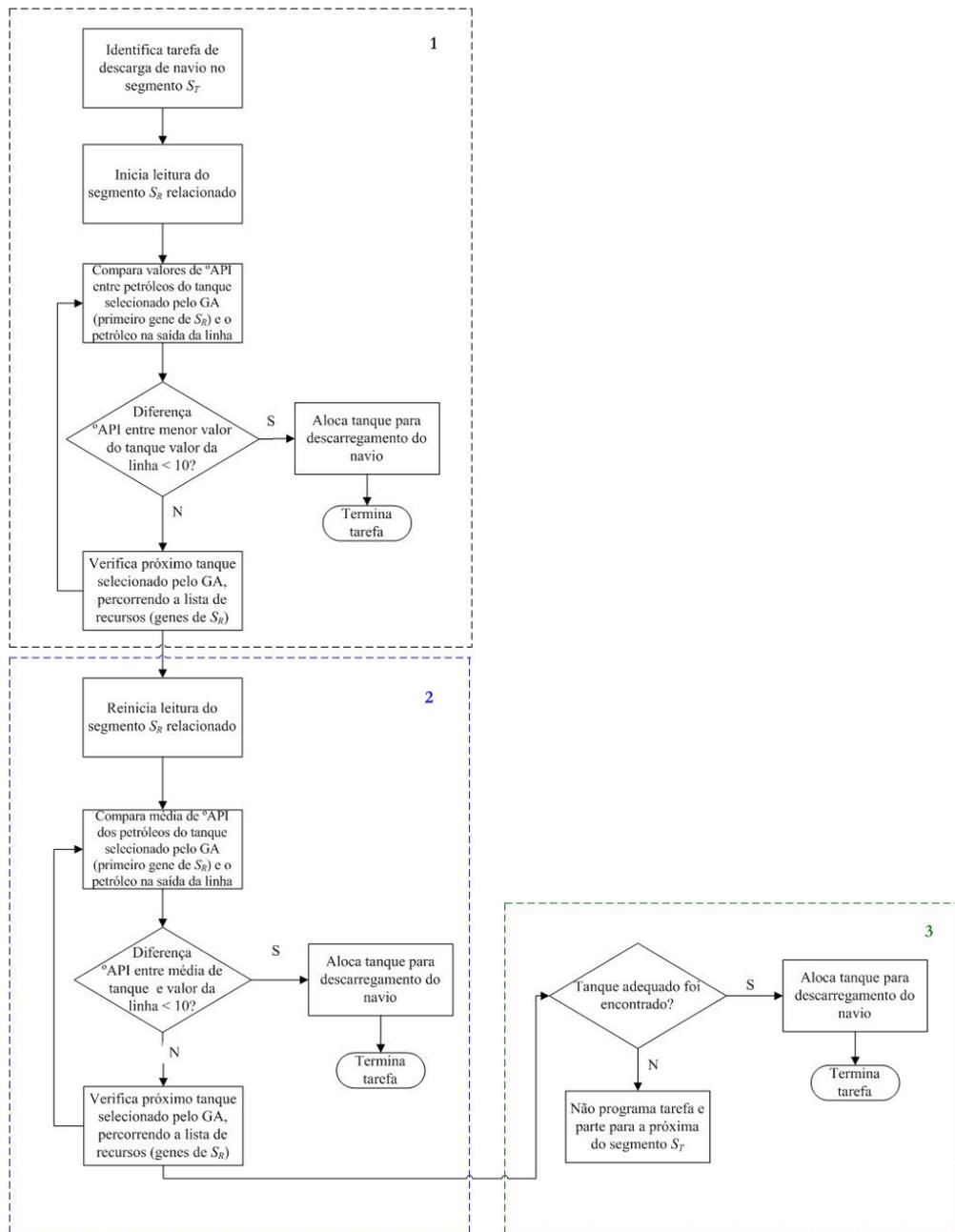


FIGURA 5.3: Decodificação para a Tarefa de Descarga de Navio

2. S_R é novamente percorrido desde o início e a verificação de diferença de densidade é feita entre o valor médio dos óleos armazenados no tanque e o °API do petróleo que se encontra na saída da linha submarina. O valor comparado corresponde à média dos °API dos óleos, ponderada por suas respectivas massas.
3. caso não seja encontrado nenhum tanque com as características necessárias para o descarregamento (passos 1 e 2), a tarefa não é programada.

5.3.2 Transferência pelo Oleoduto

A heurística usada na decodificação dessa tarefa determina os tanques de origem (terminal) e destino (refinaria). Após a identificação da tarefa de transferência pelo oleoduto no segmento S_T , o algoritmo segue os passos mostrados no fluxograma da figura 5.4 e descritos a seguir para a decodificação da tarefa.

1. o AG tenta transferir o lote a partir do tanque do terminal, indicado pelo primeiro gene do segmento S_{RT} , para o tanque da refinaria, indicado pelo primeiro gene do S_{RR} ;
2. caso não seja possível, pelo fato do tanque da refinaria e da parcela na saída do oleoduto não estarem dentro dos limites de diferenças de °API, todas as combinações possíveis de origem e destino são tentadas, ou seja, o algoritmo percorre todos os genes do segmento S_R , até que um par de tanques (origem e destino) compatível seja encontrado;
3. após encontrar o par de tanques, o algoritmo checa se o tanque de origem possui volume mínimo para atender o lote e se o tanque de destino tem espaço suficiente para receber o lote. Caso essas exigências não possam ser atendidas, o algoritmo continua percorrendo os segmentos S_{RT} e S_{RR} ;
4. caso não seja encontrada nenhuma combinação com as características necessárias para a transferência (passos 1, 2 e 3), a tarefa não é programada.

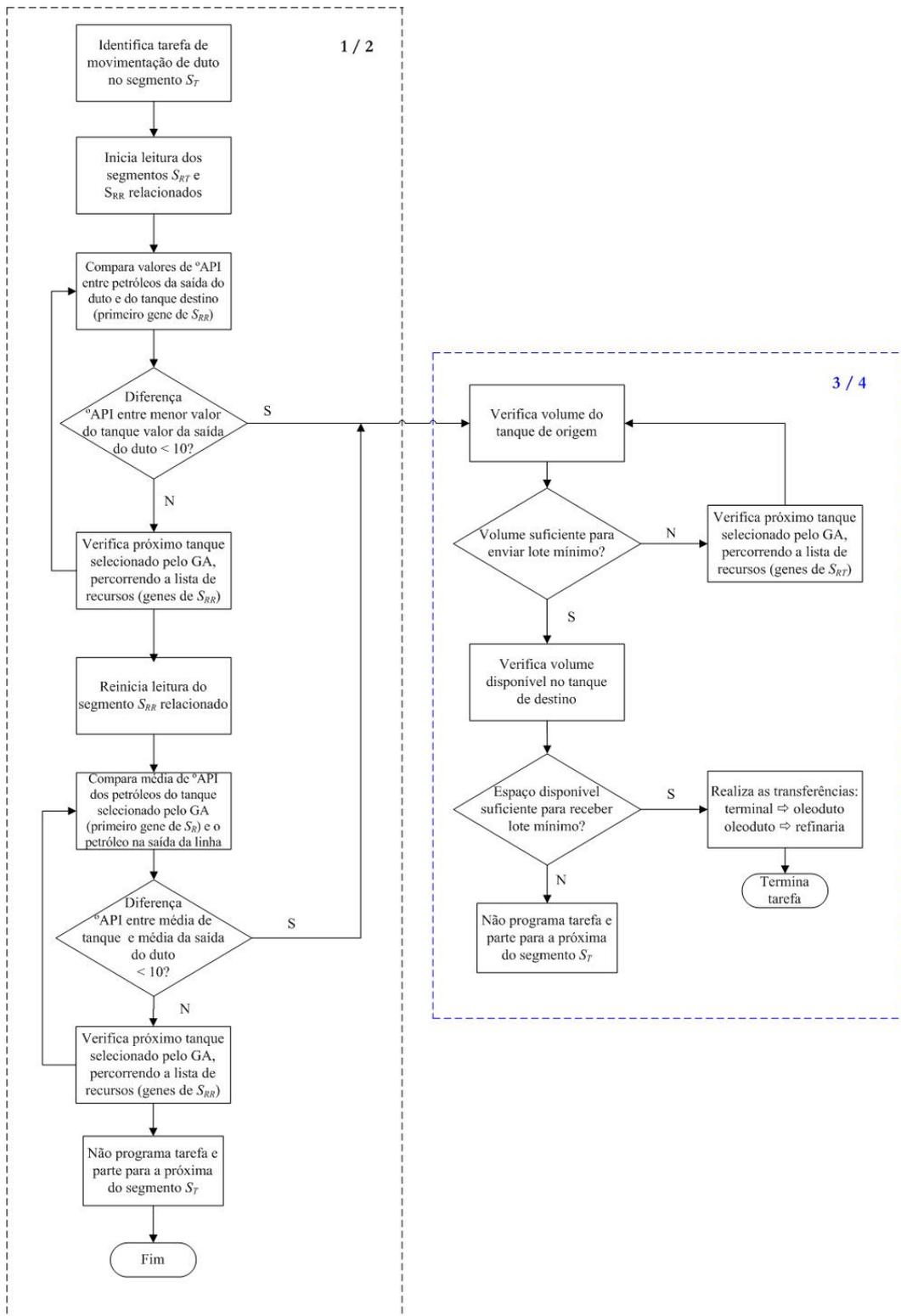


FIGURA 5.4: Decodificação para a Tarefa de Transferência pelo Oleoduto

5.3.3 Carga nas Unidades de Destilação

Ao longo do horizonte de programação, a tarefa “carga nas unidades de destilação” visa a alocação de tanques da refinaria como carga para as torres atmosféricas (U-01 e U-50), a fim de atender os volumes planejados.

Como descrito na seção 5.1.4, uma vez iniciada a carga da unidade de destilação, o tanque designado para atendê-la permanece assim durante um período mínimo.

Podem haver, no entanto, casos nos quais a troca de tanque num intervalo de tempo inferior àquele normalmente definido como “mínimo” (48 horas) seja requerida (por exemplo, num cenário de falta de determinado produto, que acarreta em uma mudança de campanha de destilação). Alguns cenários estudados neste trabalho apresentam esta característica e nestes casos, o modelo verifica, para as duas UDAs, o menor tempo de carga planejado, considerando-o como o tempo mínimo de carga. O número de tarefas é função do horizonte de planejamento para as duas unidades e do tempo mínimo de carga (ver seção 5.2.1, equação 5.1).

Como exemplo, podemos analisar os dados de planejamento para o dia 02/07/2003, fornecidos na tabela 5.4.

TABELA 5.4: Planejamento UDA - Cenário 02/07/2003

UDA	CAMPANHA	INÍCIO (h)	FIM (h)	PLANEJADO (m ³ /d)
U-01	BTE	0	329	6.000
U-50	RAT	0	39	9.000
U-50	BTE	39	99	10.000
U-50	RAT	99	169	10.000

Como mencionado anteriormente, os valores dos lotes são determinados em função da duração e da vazão de cada intervalo a ser atendido. Sendo assim, no caso mostrado na tabela 5.4, considerando o intervalo de planejamento da unidade U-01, que ocorre entre as horas 0 e 329 e, partindo-se da informação de que o tempo mínimo de duração das cargas para este planejamento foi definido em 39 h (menor intervalo planejado para as unidades, no caso para a U-50), o intervalo de planejamento da U-01 é dividido em um intervalo de 42 horas e sete de 41 horas. Esses oito *slots* de tempo representam, seqüencialmente, a duração de cada uma das tarefas encarregadas de atender todo o

horizonte de planejamento gerado. Finalmente, o volume de cada lote é obtido segundo a equação 5.2. Onde V_l é o volume transferido durante a execução da tarefa, T_l é a duração da tarefa e Q_p é a vazão (m^3/dia) planejada para a UDA. Nota-se que para esse caso, o primeiro lote com um volume de 10.500 m^3 e os demais sete lotes com volumes de 10.250 m^3 , cada.

$$V_l = \frac{T_l \times Q_p}{24} \quad (5.2)$$

A escolha do(s) tanque(s) de carga segue as considerações apontadas nas seções 5.1.4, 5.1.5 e 5.1.6. Inicialmente, o algoritmo tenta alocar o tanque indicado pelo primeiro gene do segmento S_R como principal e único. Caso não seja possível, esse tanque é fixado como principal e verifica-se a possibilidade de utilização de tanque auxiliar, através da leitura seqüencial do mesmo S_R . A necessidade de um tanque auxiliar pode ser causada pelo fato do tanque principal violar restrições de composição ou qualidade e/ou por não conter volume de cru suficiente para suprir o lote da tarefa. Em ambos os casos, a vazão do tanque principal deve ser maximizada em relação à vazão do auxiliar, sendo a mesma determinada pelas equações 5.3 e 5.4.

$$V_{pu} = p_p \times V_p \quad (5.3)$$

$$p_p = \min \left(\frac{V_a V_{u_i} - V_{a_i} V_l}{V_a V_{p_i} - V_{a_i} V_p} \right)_{i=1}^k \quad (5.4)$$

- V_{pu} é o volume do tanque principal a ser usado na carga da unidade u ;
- p_p é a proporção na qual o tanque principal deve ser utilizado na composição final da carga;
- V_p corresponde ao volume total de cru armazenado no tanque principal;
- V_l é o volume do lote (calculado com base no volume planejado);
- V_{p_i} e V_{a_i} correspondem aos volumes dos crus limitantes, presentes nos tanques principal e auxiliar, respectivamente;
- V_{u_i} representa o volume máximo do cru i que pode ser processado pela UDA na carga do lote, com base na limitação de carga das unidades (ver tabela 5.2);

- V_a corresponde a previsão de volume do tanque auxiliar ($V_a = V_i - V_p$);
- o parâmetro k corresponde ao número de crus cujas proporções limitam a operação das unidades (atualmente, $k = 2$, ver tabela 5.2).

Uma vez não encontrado nenhum tanque que sirva como auxiliar para o principal em questão, o algoritmo verifica, a partir a leitura sequencial do segmento S_R , outro tanque para ser alocado nesta tarefa como principal. O processo repete-se até que seja(m) encontrado(s) um ou dois tanques, ou até que a leitura do S_R termine, não havendo programação da tarefa. Nesse caso, o algoritmo volta a percorrer o segmento S_T para programar a próxima tarefa definida pelo AG. Caso não haja volume suficiente em ambos os tanques para atender V_p e V_a , respectivamente, o uso simultâneo dos dois tanques não é permitido.

O fluxograma mostrado na figura 5.5 apresenta os passos para a decodificação da tarefa de carga nas unidades de destilação.

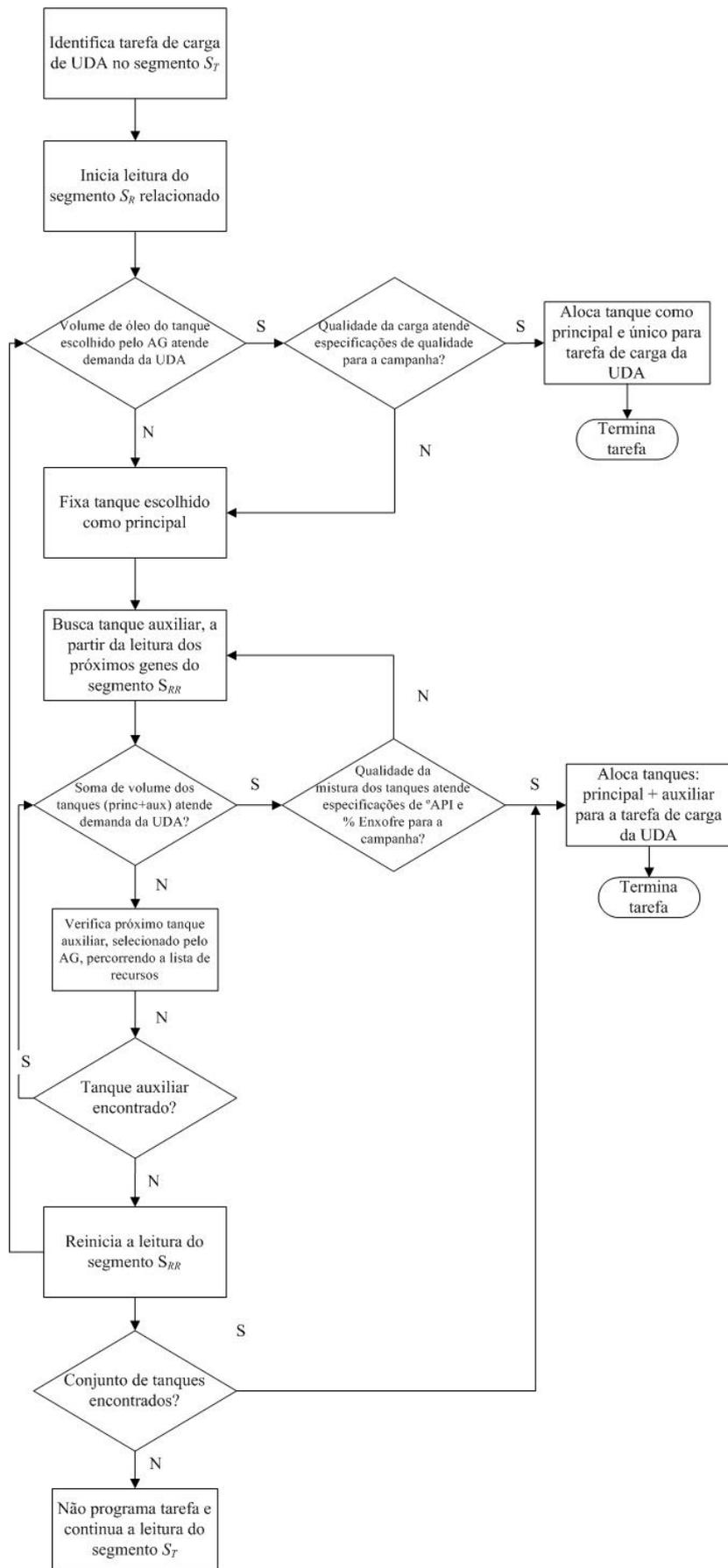


FIGURA 5.5: Decodificação para a Tarefa de Carga na UDA

5.4 Avaliação

A avaliação da programação gerada pelo algoritmo genético é feita através da simulação do funcionamento da área de cru, mostrada na figura 4.4.

Os objetivos envolvidos na função de avaliação usada pelo algoritmo genético encontram-se descritos a seguir.

Minimização do desvio de volume programado x planejado: o volume processado pelas unidades deve ser o mais próximo possível do volume definido no planejamento de produção. O volume de carga é penalizado em função da diferença entre qualidade requerida na campanha e qualidade da carga.

Minimização dos custos por sobreestadia: conforme descrito na seção 5.1.3.1, descarregamentos de navios que duram mais de 30 horas incorrem em multas altas e, portanto, devem ser evitados.

Minimização do número de troca de tanques: cada troca de tanque dentro de uma mesma tarefa representa um acréscimo ao custo operacional, além de causar instabilidades ao sistema. Sendo assim, o número total de vezes que as trocas ocorrem durante a programação deve ser minimizado.

Minimização do tempo ocioso de duto: a operação contínua do duto garante um nível seguro de estoque de petróleo na refinaria.

Estes objetivos devem ser quantificados a fim de obter um valor numérico de avaliação do indivíduo, ou seja, sua aptidão. Quando múltiplas medidas de performance são necessárias para a avaliação da qualidade das soluções, torna-se necessária a definição da combinação dessas diferentes medidas, de maneira a fornecer e quantificar a melhor solução. A esse tipo de problema aplicam-se, normalmente, os chamados “métodos para agregação de múltiplos objetivos”.

Para combinar os quatro objetivos do problema de programação da área de cru da REFAP utilizou-se a técnica de “distância do valor ao alvo”. Esta técnica exige que sejam conhecidos valores para cada alvo referente a cada um dos objetivos mencionados. Além disso, a normalização desses valores também é fator relevante para o bom desempenho do método.

5.4.1 Avaliação da Solução pela Técnica de Distância do Valor ao Alvo

Na técnica de distância ao alvo a solução é avaliada pelo cálculo da distância entre as medidas de performance do conjunto de soluções e um valor alvo, fornecido pelo usuário. O valor alvo deve representar uma avaliação ideal para cada medida de performance.

Formalmente, este método de avaliação pode ser descrito conforme a equação 5.5.

$$F = \left(\sum_{i=1}^N |user_i - f_i|^p \right)^{1/p} \quad p \geq 1 \quad (5.5)$$

- F é o resultado da função de avaliação (*fitness*);
- $user_i$ corresponde ao alvo fornecido pelo usuário;
- f_i representa as medidas de performance do conjunto de soluções;
- p corresponde ao “grau de afastamento” do objetivo;
- N é o número de objetivos.

A forma quadrática da função ($p = 2$) penaliza as soluções cujos valores de f_j estejam distantes do valor alvo $user_j$ e, ao mesmo tempo, beneficia as soluções com valores próximos ao valor alvo $user_j$.

As normalizações dos valores de cada medida de performance foram feitas entre 0 e 1, utilizando as premissas descritas a seguir.

Volume não atendido de carga: o volume de carga é normalizado em função do volume planejado (equação 5.6).

$$f_1 = 1 - \frac{\sum_{u=1}^2 V_{au}}{\sum_{u=1}^2 V_{du}} \quad (5.6)$$

- V_{au} corresponde ao volume de petróleo atendido na unidade u (calculado em função da qualidade da carga e definido na equação 5.11);
- V_{du} refere-se ao volume planejado para a unidade u .

Tempo de atraso na descarga dos navios: definiu-se como valor máximo para esse objetivo o número total de horas do horizonte de planejamento menos o tempo máximo permitido para o descarregamento por navio (equação 5.7).

$$f_2 = \frac{S}{S_{\max}} \quad (5.7)$$

- S é o tempo gasto para descarregar o navio além das 30 horas permitidas (sobreestadia);
- S_{\max} corresponde ao tempo máximo de sobreestadia que o descarregamento pode levar naquele cenário, definido pela equação 5.8:

$$S_{\max} = T_{hor} - T_{ini} - T_{des} \quad (5.8)$$

- T_{hor} representa o horizonte de programação (maior tempo de planejamento de carga entre U-01 e U-50);
- T_{ini} refere-se a hora de início de descarregamento (amarração do navio);
- T_{des} é o tempo limite (em horas) para descarregamento do navio (a partir do qual a sobreestadia começa a ser contada).

Número de trocas de tanques: o valor máximo para esse objetivo é o número máximo de tarefas que o algoritmo genético pode programar dentro do horizonte de planejamento (equação 5.9).

$$f_3 = \frac{N_{tq}}{N} \quad (5.9)$$

- N_{tq} corresponde ao número de troca de tanques;
- N tamanho do segmento de tarefas (S_T) no cromossomo.

Tempo ocioso de duto: o valor máximo adotado neste caso é o número total de horas do horizonte de programação (equação 5.10).

$$f_4 = \frac{T_{par}}{T_{hor}} \quad (5.10)$$

- T_{par} corresponde ao tempo total (horas) de ociosidade do duto.

Sendo assim, verifica-se que o ponto ótimo idealizado (se não existissem as restrições do problema) no espaço de busca tem coordenadas $f_{ot} = (0, 0, 0, 0)$ e a função de avaliação consiste em minimizar a distância de uma solução ao ponto ótimo. Utilizou-se $p = 2$ para a execução da avaliação.

Os volumes totais planejados para as unidades U-01 e U-50 são ponderados pelos desvios das especificações de °API e teor de enxofre ao longo das campanhas. Estes valores são calculados através da equação 5.11.

$$V_{au} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k V_{di} \left(\frac{D_{Au} - |A_{Ci} - A_{Ui}|}{D_{Au}} + \frac{D_{Su} - |S_{Ci} - S_{Ui}|}{D_{Su}} \right) \quad (5.11)$$

- k : número total de lotes que compõem o volume demandado, V_{au} , pela UDA u , em todo o horizonte de programação;
- V_{di} : volume do lote i ;
- D_{Au} : diferença de °API entre os petróleos de maior e de menor valor, dentre aqueles que podem ser processados na refinaria;
- D_{Su} : diferença de teor de enxofre entre os petróleos de maior e de menor valor, dentre aqueles que podem ser processados na refinaria;
- A_{Ci} e S_{Ci} : valores médios de °API e teor de enxofre, respectivamente, do lote i , ponderados pelos volumes do crus contidos na carga;
- A_{Ui} e S_{Ui} : valores especificados de °API e índice de enxofre, respectivamente, para a campanha da UDA u que será atendida pelo lote i ;

A cada uma das parcelas foram atribuídos pesos, de acordo com a relevância do objetivo para o processo. Como todas as parcelas da função de avaliação foram normalizadas, os fatores utilizados têm a mesma ordem de grandeza e foram baseados no conhecimento específico do problema.

5.5 Operadores

Os operadores utilizados em todos os segmentos dos indivíduos são operadores de problemas de ordem. De acordo com (MICHALEWICZ 1996), até recentemente, três

tipos de *crossover* diferentes foram definidos para representações baseadas em ordem: o *crossover* de mapeamento parcial (*Partially Mapped Crossover* - PMX), o *crossover* de ordem (*Order Crossover* - OX) e o *crossover* de ciclo (*Cycle Crossover* - CX).

O operador PMX constrói descendentes através da seleção de uma subsequência de um genitor, mantendo a ordem e a posição do maior número de genes possível do outro genitor. Esta subsequência é escolhida selecionando-se dois pontos de corte aleatoriamente. Por exemplo, sejam os dois cromossomas abaixo (os pontos de corte estão indicados pelo sinal |):

$$p_1 = (123|4567|89)$$

$$p_2 = (452|1876|93)$$

Os descendentes destes dois cromossomos são formados da seguinte maneira:

1. os segmentos que estão entre os pontos de corte são trocados;

$$d_1 = (xxx|1876|xx)$$

$$d_2 = (xxx|4567|xx)$$

2. esta troca define também mapeamentos entre os valores: $1 \leftrightarrow 4$; $8 \leftrightarrow 5$; $7 \leftrightarrow 6$; $6 \leftrightarrow 7$;
3. os elementos restantes são preenchidos utilizando-se aqueles originais de cada genitor, desde que não haja nenhum conflito;

$$d_1 = (x23|1876|x9)$$

$$d_2 = (xx2|4567|93)$$

4. finalmente, o mapeamento gerado pela troca feita anteriormente (item 2) é utilizado.

$$d_1 = (423|1876|59)$$

$$d_2 = (182|4567|93)$$

O operador do tipo PMX explora importantes similaridades nos valores e na ordem, quando usado nas situações corretas.

O operador OX constrói os descendentes selecionando uma subsequência de um genitor e preservando a ordem relativa dos genes do outro genitor. Por exemplo, sejam os mesmos cromossomos (p_1 e p_2) definidos anteriormente. Os descendentes são gerados da seguinte forma: primeiro seleciona-se os pontos de corte. Supondo que os cortes sejam os mesmos do exemplo anterior, copia-se os valores de um genitor para o outro, a partir do segundo ponto de corte, mantendo-se a mesma ordem e omitindo-se os símbolos já presentes. Esta seqüência de valores do segundo genitor, por exemplo, a partir do segundo ponto de corte seria (934521876). Removendo-se os valores 4, 5, 6 e 7 que já existem no primeiro descendente, tem-se a seqüência (93218). Coloca-se esta seqüência no primeiro descendente (também a partir do segundo ponto de corte) e repete-se a operação para o segundo (selecionando a seqüência de valores do primeiro genitor). Como resultado obtém-se:

$$d_1 = (218|4567|93)$$

$$d_2 = (345|1876|92)$$

Para o operador OX a ordem dos genes é o fator mais importante e não a sua posição.

Finalmente, o operador CX constrói descendentes de modo que cada valor e a sua posição venham de um dos genitores. Considerando-se como exemplo os dois cromossomos abaixo:

$$p_1 = (123456789)$$

$$p_2 = (412876935)$$

O primeiro descendente é produzido a partir do primeiro elemento do primeiro genitor (neste caso, 1). O valor correspondente a este no segundo genitor é 4, que deve, portanto ser colocada no primeiro descendente, na mesma posição em que ela se encontra no primeiro genitor. Desta forma, tem-se a seguinte estrutura resultante:

$$d_1 = (1xx4xxxxx)$$

Esta escolha implica na seleção do valor 8 (que está na posição correspondente no segundo genitor). Desta forma, tem-se: $d_1 = (1xx4xxx8x)$. Seguindo esta regra,

os próximos valores escolhidos são 3 e 2. A seleção do valor 2, leva à escolha do 1 do segundo genitor, que já está na lista, desta forma, tem-se um ciclo completo e os demais valores são preenchidos a partir do segundo genitor e os cromossomos resultantes são:

$$d_1 = (123476985)$$

$$d_2 = (412856739)$$

Para operadores genéticos de mutação foram usados dois tipos: *swap* e Inversão de Posição (*Position Inversion* - PI).

O operador *swap* seleciona dois genes aleatoriamente e troca suas posições. Por exemplo, o cromossomo (123456789), após serem selecionadas para mutação os genes 3 e 8, ficaria (128456739).

O operador PI seleciona dois pontos de corte no cromossomo e inverte os elementos situados entre estes dois pontos. por exemplo, o cromossomo (123||4567||89), com os pontos de corte designados pelo símbolo “||”, após a mutação torna-se (123||7654||89).

Capítulo 6

Estudo de Caso

Conforme mencionado anteriormente, o estudo de caso adotado para esta dissertação baseou-se no problema de programação de petróleos da REFAP, cujas características operacionais e de modelo foram relatadas nos capítulos 4 e 5, respectivamente.

6.1 Experimentos Computacionais

As implementações computacionais foram feitas em plataforma .NET, utilizando a linguagem de programação C# e executadas em uma máquina Pentium IV 2,66 GHz, com 1 GB de memória RAM.

Para testar o desempenho do modelo, foram executados os dados de planejamento coletados na REFAP com as seguintes datas: 28/05/2003, 02/06/2003, 09/06/2003, 16/06/2003 e 02/07/2003. Para todas as instâncias é conhecida uma solução viável, obtida no trabalho de (MAGALHÃES 2004). Para a instância 02/07/2003, em especial, conhece-se também a solução do programador. Os dados de entrada encontram-se no Apêndice A e são passados ao algoritmo através de um arquivo, cujo conteúdo encontra-se listado a seguir.

- Dados de petróleos processados
 - Nome
 - °API
 - Teor de enxofre

- Dados de descarregamento de navio
 - Hora prevista de amarração do navio
 - Nome do petróleo
 - Volume (m^3)
 - Estoque inicial das linhas submarinas (petróleo e volume)

- Dados de estoque inicial de tanques (terminal e refinaria)
 - Volume disponível em tanque (m^3)
 - Lista de petróleos
 - Composição de cada petróleo da lista (m^3)

- Dados de duto
 - Itens de cru
 - Lista de petróleos de cada item de cru
 - Volume de cada petróleo nos itens de cru (m^3)

- Dados de unidades de destilação
 - Tempo de preparo de tanque (h)
 - Tempo mínimo de carga (h)
 - Dados de campanha: vazão planejada (m^3 /dia), °API e teor de enxofre
 - Fração máxima de petróleos limitantes

As etapas executadas na realização dos experimentos computacionais encontram-se a seguir.

1. Determinação da melhor configuração dos parâmetros de AG para o problema. Esta etapa foi realizada em três passos.
 - Definição do número máximo de gerações e do número de experimentos.

- Definição dos operadores de *crossover* e mutação: o GACOM possui, para problemas baseados em ordem, três operadores de cruzamento e dois de mutação. O desempenho dos mesmos foi analisado individualmente e em conjunto.
 - Definição das taxas de mutação e de *crossover*.
2. Verificação da robustez do modelo, através de análise dos resultados frente a modificações nos parâmetros de execução.
 3. Solução de todas as instâncias para o problema de programação de petróleos, usando a configuração definida no item 1.

6.1.1 Definição da Configuração dos Parâmetros do AG

Determinou-se a melhor configuração de parâmetros para o problema com base em testes realizados na instância de 02/07/2003. O tamanho da população foi fixado em 100 indivíduos, baseado nos trabalhos apresentados por (CRUZ 2003) e (SIMÃO 2004).

Vale ressaltar que a atribuição de pesos para as parcelas da função de avaliação no conhecimento específico do problema, utilizando-se os mesmos fatores adotados por (MAGALHÃES 2004) em seu trabalho. O número de gerações e o número de experimentos foram definidos como critérios de parada e a determinação dos melhores valores para estes parâmetros foi realizada através da execução do algoritmo utilizando 1000 gerações e 10 experimentos. Através destas execuções, verificou-se a total estabilidade dos resultados na ducentésima geração e pequeno desvio nos resultados de um experimento para o outro. Com base nestas indicações e, mantendo-se algum conservadorismo, admitiu-se os valores: 400 gerações e 4 experimentos para os próximos testes.

Conforme mencionado anteriormente, foram testados os cinco operadores implementados na biblioteca GACOM. Para os testes foram feitas combinações entre os parâmetros e as taxas, com base nos valores mostrados na tabela 6.1.

TABELA 6.1: Valores Testados para Parâmetros de AG

TIPO DE CROSSOVER	TAXA	TIPO DE MUTAÇÃO	TAXA
PMX	0,9-0,7 / 0,8-0,5	swap	0,05-0,1 / 0,05-0,3 / 0,05-0,5
OX	0,9-0,7 / 0,8-0,5	PI	0,05-0,1 / 0,05-0,3 / 0,05-0,5
CX	0,9-0,7 / 0,8-0,5	swap+PI	0,05-0,1 / 0,05-0,3 / 0,05-0,5
PMX+OX+CX	0,9-0,7 / 0,8-0,5		

Os dados da tabela 6.1 fornecem 88 combinações possíveis. Para todas as execuções considerou-se o uso do elitismo (*steady-state*), com um *gap* de 25%. A partir das soluções geradas foi possível identificar, com base nos resultados da função de avaliação e de suas parcelas, as configurações que originaram os melhores resultados.

A configuração dos parâmetros de AG que apresentou os melhores resultados encontra-se na tabela 6.2.

TABELA 6.2: Características e Valores da Configuração de Parâmetros

PARÂMETRO	CONFIGURAÇÃO	
	TIPO	VALOR
Crossover	PMX+OX+CX	0,9 - 0,7
Mutação	swap	0,05 - 0,3
Número de gerações		400
Número de experimentos		4
Tamanho da população		100

A tabela 6.3 apresenta os resultados da função de avaliação e de cada uma de suas parcelas, obtidos com a configuração descrita na tabela 6.2.

TABELA 6.3: Resultados da função de avaliação para a melhor configuração

RESULTADOS	
Função de Avaliação	3,5418
Volume Penalizado (m ³)	25.580,33
Tempo de Sobreestadia (h)	0
Número de Trocas	17
Tempo de Duto Parado (h)	193,5

6.1.2 Testes de Robustez do Modelo

Os testes de robustez realizados no modelo objetivaram a verificação da coerência das soluções, frente a modificações nos parâmetros do problema. Os cenários testados são apresentados a seguir.

- **Teste A:** aumento do peso da parcela referente à minimização do volume penalizado;
- **Teste B:** redução do peso da parcela referente à minimização do tempo de sobreestadia;
- **Teste C:** redução do peso da parcela referente à minimização do número de trocas de tanques;
- **Teste D:** aumento do peso da parcela referente à minimização do tempo ocioso de duto.

A tabela 6.4 apresenta os resultados dos testes descritos acima. A coluna REFERÊNCIA mostra os pesos definidos como “base” e os resultados encontrados para este caso. As colunas chamadas TESTE X apresentam os fatores modificados, de acordo com os testes propostos (A, B, C e D) e os resultados da função de avaliação encontrados para os mesmos.

TABELA 6.4: Resultados do Teste de Robustez - CONFIG 1

AVALIAÇÃO	REFERÊNCIA		TESTE A		TESTE B		TESTE C		TESTE D	
	PESOS	SOLUÇÃO	PESOS	SOLUÇÃO	PESOS	SOLUÇÃO	PESOS	SOLUÇÃO	PESOS	SOLUÇÃO
Volume penalizado (m ³)	5,0	25.095,31	10,0	23.391,81	5,0	52.688,31	5,0	26.154,32	5,0	26.283,60
Tempo de sobreestadia (h)	10,0	0	10,0	0	1,0	24,7	10,0	0	10,0	0
Número de trocas tanques	6,0	17	6,0	20	6,0	16	3,0	23	6,0	22
Tempo ocioso de duto (h)	5,0	193,5	5,0	191	5,0	172	5,0	166	10,0	154

6.1.3 Soluções das Instâncias

Todas as instâncias descritas no Apêndice A foram resolvidas utilizando-se a configuração obtida na seção 6.1.1 e descrita na tabela 6.2. As principais características das instâncias analisadas encontram-se resumidas na tabela 6.5 e os resultados da função de avaliação e de suas respectivas parcelas encontram-se reportados na tabela 6.6.

TABELA 6.5: Principais características das instâncias

	28/05/03	02/06/03	09/06/03	16/06/03	02/07/03
Volume Planejado (m ³)	131.167	126.000	175.167	199.000	150.625
Horizonte de Programação (h)	184	199	279	306	329
Número de Navios	3	2	1	-	1
Volume a Descarregar (m ³)	254.500	211.000	70.000	-	40.000

Em função das diferentes características apresentadas na tabela 6.5 pode-se mensurar os diferentes graus de dificuldade de programação para cada um dos cenários. Por exemplo, a tarefa de descarregamento de navio tem sua programação dificultada nos cenários 28/05/2003 e 02/06/2003, onde se tem mais de um navio de grande volume a descarregar. Já nos cenários 09/06/2003 e 02/07/2003 esta tarefa não deve representar grande desafio para o algoritmo, dado o menor volume a descarregar e o horizonte de programação maior que nos dois primeiros casos. Na instância de 16/06/2003 não há previsão de chegada de navios, o que pode, inclusive, favorecer a programação das demais tarefas.

Ao observarmos os dados da programação de carga para as unidades de destilação, verifica-se, através de uma rápida análise da vazão média planejada, que o cenário mais desafiador é o do dia 16/06/2003, o qual exige uma vazão média de aproximadamente 15.608 m³/dia, enquanto que a menor vazão média é 10.988 m³/dia, planejada para o cenário de 02/07/2003.

Os resultados do AG para as instâncias encontram-se na tabela 6.6. Análises mais detalhadas da instância 02/07/2003 serão feitas a seguir e das demais instâncias encontram-se no Apêndice C.

TABELA 6.6: Resultados das instâncias usando o modelo de AG

	28/05/03	02/06/03	09/06/03	16/06/03	02/07/03
Função de Avaliação	2,9596	2,9789	3,0465	3,5038	3,5418
Volume penalizado (m³)	28.621	23.095	33.044	57.648	25.095
Sobreestadia (h)	0	0	0	-	0
Número de trocas de tanques	15	30	17	17	17
Tempo de duto inoperante (h)	96	84,6	141	159	193,5

6.1.3.1 Programação 28/05/03

A figura 6.1 resume, através do gráfico de Gantt, os resultados obtidos para este cenário de programação. O gráfico apresenta a seqüência e a duração das tarefas, bem como a utilização dos recursos.

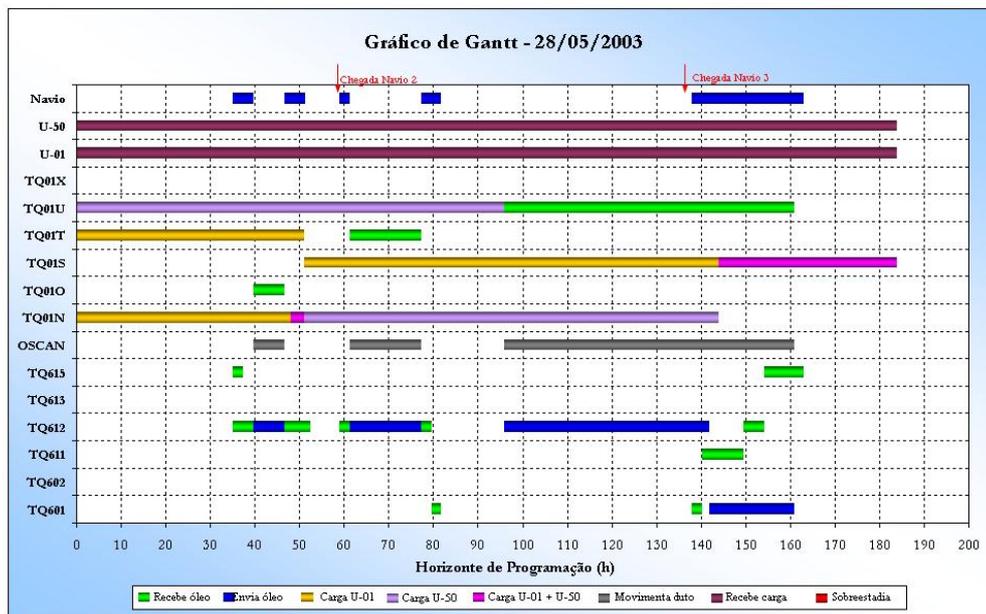


FIGURA 6.1: Gráfico de Gantt - 28/05/03

Através do gráfico de Gantt pode-se observar que:

- todo o volume a ser descarregado foi realizado sem sobreestadia para nenhum dos três navios;

- o envio do volume inicial das linhas submarinas (“line displacement”), que ocorreu no início da descarga do primeiro navio, foi feito para os tanques TQ615 e TQ612, pois tratavam-se de dois óleos diferentes (BONL na linha Norte e PENL na linha Sul);
- os tanques TQ602, TQ613 e TQ01X não foram utilizados ao longo do horizonte de programação;
- o recurso TQ612 teve ocupação muito maior que os demais tanques do TEDUT;
- os recursos TQ01N, TQ01S e TQ01U foram os mais requisitados para carga das unidades de destilação;
- os tanques TQ01O, TQ01T e TQ01U receberam o volume movimentado no OSCAN;
- as unidades U-01 e U-50 operaram ininterruptamente durante todo o horizonte planejado.

A tabela 6.7 mostra, para cada uma das UDAs, os resultados de atendimento ao volume de carga, apresentando o volume planejado para o horizonte de programação e o volume penalizado para o mesmo período. Na mesma tabela encontra-se o número de trocas de tanques referentes à tarefa de carga das unidades de destilação.

TABELA 6.7: Resultados de Atendimento à Demanda - 28/05/03

UNIDADE	NUM. TROCAS TQS DE CARGA	VOLUME PLANEJADO (m³)	VOLUME PENA- LIZADO (m³)
U-01	1	54.500	15.942
U-50	3	76.667	12.678

O volume penalizado é função da diferença entre a qualidade requerida pela campanha e a qualidade da carga programada. Desta forma, os resultados obtidos para o cenário de 28/05/2003 apontam uma “perda” de 28.621m³, devido à carga “fora de especificação”.

As tabelas 6.8 e 6.9 mostram as informações detalhadas sobre os volumes planejados e programados para cada uma das unidades de destilação. As linhas PRINC e AUX indicam os tanques escolhidos como principal e auxiliar, respectivamente, para alimentar as unidades durante os períodos mostrados na primeira linha da tabela. Nas linhas VAZÃO encontram-se os valores de “vazão atendida” para o referido período (em m³/dia) e nas linhas PLAN e PENAL, as vazões planejada e penalizada (também medidas em m³/dia), respectivamente. Finalmente, os valores de °API, teor de enxofre e a fração dos petróleos limitantes encontram-se nas linhas API, %S, CND e MRL.

TABELA 6.8: Informações de programação de carga da U-01 - 28/05/03

PERÍODO		0 - 51	51 - 96	96 - 140	140 - 184
U-01	PRINC	TQ01N	TQ01S	TQ01S	TQ01S
	VAZÃO	5.409	4.430	4.430	4.430
	AUX	TQ01T	-	-	-
	VAZÃO	1.067	-	-	-
	PLAN	10.000	6.000	6.000	6.000
	PENAL	3.525	1.570	1.570	1.570
	API	35,111	29,212	29,212	29,212
	%S	0,123	0,370	0,370	0,370
	CND	0,034	0,025	0,025	0,250
	MRL	0,058	0,386	0,386	0,386

TABELA 6.9: Informações de programação de carga da U-50 - 28/05/03

PERÍODO		0 - 48	48 - 96	96 - 144	144 - 184
U-50	PRINC	TQ01U	TQ01U	TQ01N	TQ01S
	VAZÃO	8.191	5.678	9.423	5.727
	AUX	-	TQ01N	-	-
	VAZÃO	-	3.407	-	-
	PLAN	10.000	10.000	10.000	10.000
	PENAL	1.809	914	577	4.473
	API	33,549	34,812	35,251	29,212
	%S	0,363	0,257	0,079	0,370
	CND	0,328	0,215	0,026	0,025
	MRL	0,160	0,100	0,000	0,386

Verifica-se, na programação da U-01, uma troca de tanque: do par TQ01N e TQ01T para o TQ01S no instante 51h. O tanque TQ01S permanece em carga até o final do horizonte e, pode-se afirmar que a troca ocorreu devido à mudança de campanha nesta unidade. Para a unidade U-50 observam-se três trocas de tanques: TQ01U para TQ01U + TQ01N no instante 48h, deste par para o TQ01N em 96h até 144h, quando ocorre a troca para o TQ01S, que permanece como carga até o final do horizonte. A troca ocorrida no instante 144h deveu-se à mudança de campanha e as outras ocorreram durante a campanha BTE. Observa-se, nas linhas API, %S, CND e MRL, da tabela 6.9, a tentativa do AG de encontrar melhor solução em termos de qualidade de carga e de composição de petróleos limitantes para a U-50, o que leva conseqüentemente à melhora do resultado da função de avaliação.

A tabela 6.10 apresenta informações detalhadas sobre as tarefas de movimentação de itens de cru para a instância de 28/05/2003. As colunas TIE e TFE correspondem aos instantes nos quais o item de cru inicia e termina sua ENTRADA no duto, respectivamente; enquanto as colunas TIS e TFS correspondem aos instantes de início e fim de SAÍDA do duto, respectivamente. A coluna PETRÓLEO mostra os óleos componentes daquele item e suas respectivas composições. As colunas ORIGEM e DESTINO indicam, respectivamente, o tanque do qual o item é oriundo no terminal e no qual o mesmo é recebido na refinaria.

Nota-se que os dois primeiros itens correspondem ao estoque inicial do duto, demonstrando o bombeamento destes itens para o OSCAN antes do início do horizonte. De maneira similar, os itens 7 e 8 foram os últimos bombeios dos tanques TQ612 e TQ601 e ocuparam completamente o OSCAN até o final do horizonte.

TABELA 6.10: Informações de movimentação de itens de cru - 28/05/03

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	TIE	TFE	TIS	TFS	PETRÓLEO	ORIGEM	DESTINO	VOLUME DESTINO
1	7.000			39,7	46,7	BONL-7,9% MR33-88,9% NKOS-3,2%	OSCAN	TQ01O	
2	16.000			61,3	77,3	BONL-7,9% MR33-88,9% NKOS-3,2%	OSCAN	TQ01T	
3	7.000	39,7	46,7	96	103	PENL-100%	TQ612	TQ01U	
4	16.000	61,3	77,3	103	119	PENL-100%	TQ612	TQ01U	
5	46.000	96	142	119	161	PENL-100%	TQ612	TQ01U OSCAN	42.000 4.000
6	19000	142	161			PENL-100%	TQ601	OSCAN	

TABELA 6.11: Informação de utilização de duto - 28/05/03

UTILIZAÇÃO DE DUTO			
PARADA	INÍCIO (h)	FIM (h)	DURAÇÃO
1	0	39,67	39,67
2	46,67	61,33	14,67
3	77,33	96	18,67
4	161	184	23
Tempo total de ociosidade			96
% Ociosidade			52,2%
% Utilização do duto			47,8%

Informações complementares sobre a operação do OSCAN encontram-se na tabela 6.11, onde são mostrados os instantes das paradas de operação do duto, a duração de cada uma delas, o tempo total de ociosidade do duto e o percentual de utilização do mesmo.

A instância 28/05/2003 possui uma característica particular de descarregamento de navios, pois no início do horizonte de programação as linhas submarinas possuem petróleos diferentes (ver tabela A.4) e o volume de cada uma delas é enviado para tanques diferentes de acordo com as regras estabelecidas no capítulo 5 (o petróleo BONL para o TQ615 e o PENL para o TQ612). O gráfico de Gantt (figura 6.1) para esta instância mostra claramente a utilização simultânea dos recursos TQ615 e TQ612.

A tabela 6.12 apresenta as informações de programação para o descarregamento dos três navios com recebimento previsto na instância. Nesta tabela são mostrados o volume dos navios, início e fim de cada descarregamento e o volume destinado para os tanques.

TABELA 6.12: Informações de descarregamento de navio - 28/05/03

NAVIO	VOLUME (m ³)	TID	TFD	PETRÓLEO	LINHA	DESTINO		
						TQ612		
1	63.500	35,0	52,6	PENL	N + S	TQ612		
						63.500		
2	40.000	59,0	81,7	PENL	N + S	TQ612	TQ601	
						14.000	26.000	
3	151.000	138,0	163,2	PENL	N + S	TQ611	TQ612	TQ615
						55.000	29.000	53.000
								14.000

Os gráficos a seguir possibilitam a melhor visualização das observações feitas nos parágrafos acima.

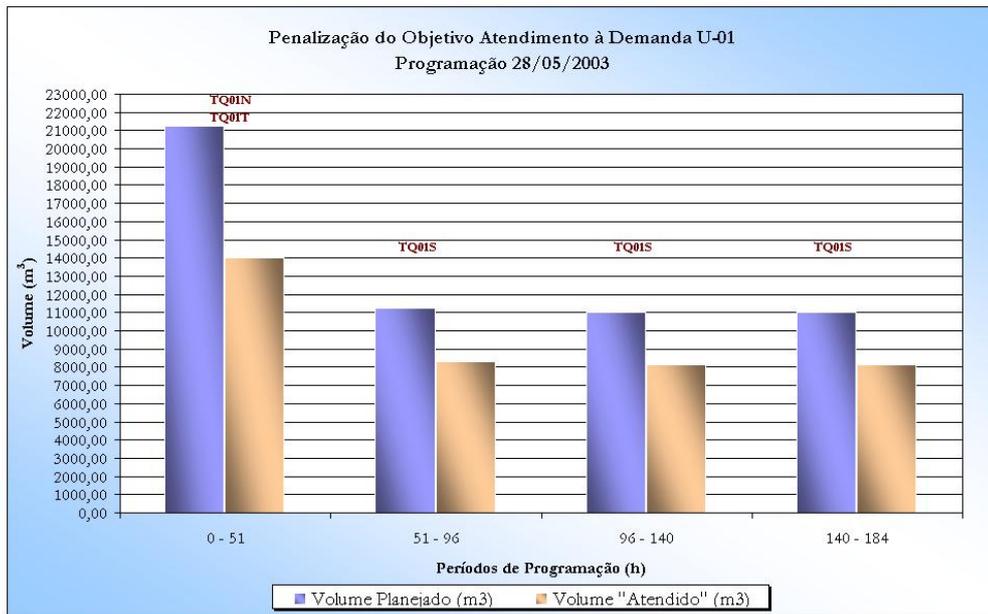


FIGURA 6.2: Atendimento ao volume planejado U-01 - 28/05/03

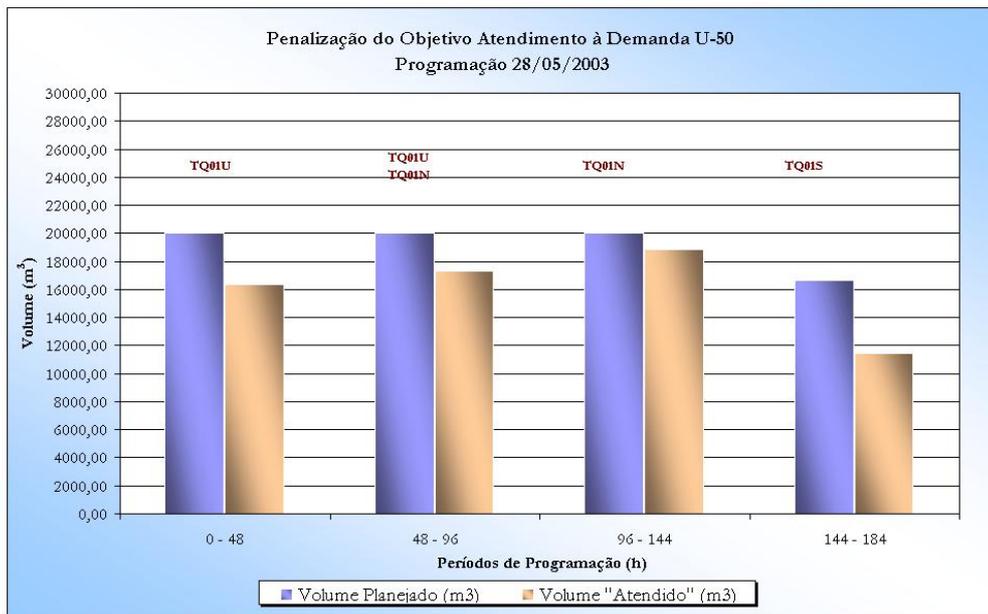


FIGURA 6.3: Atendimento ao volume planejado U-50 - 28/05/03

As figuras 6.2 e 6.3 apresentam os valores de volume planejado e de volume programado para a U-01 e U-50, respectivamente, com as indicações dos tanques de carga utilizados em cada período. Conforme mencionado anteriormente, ao volume programado é atribuída uma penalização em função da qualidade da carga. A visualização

dos dados de qualidade de carga pode ser feita através dos gráficos 6.4 e 6.5 para °API e 6.6 e 6.7 para o teor de enxofre.

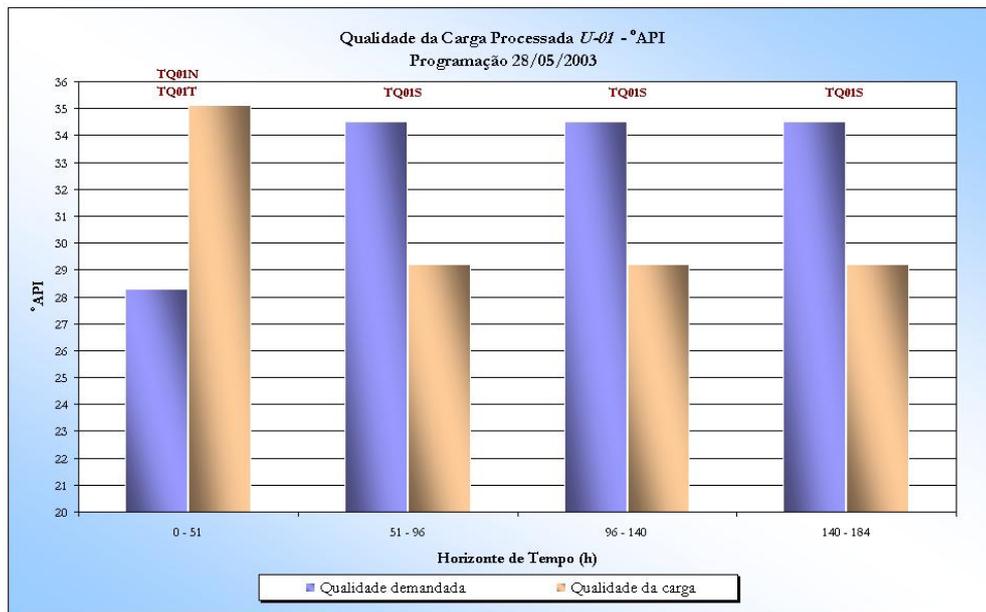


FIGURA 6.4: API da carga U-01 - 28/05/03

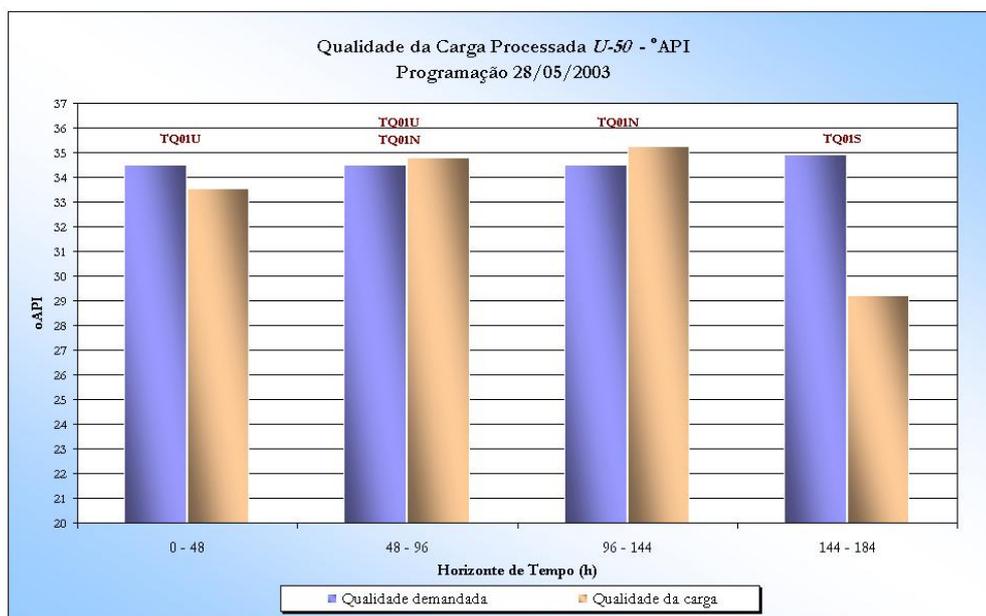


FIGURA 6.5: API da carga U-50 - 28/05/03

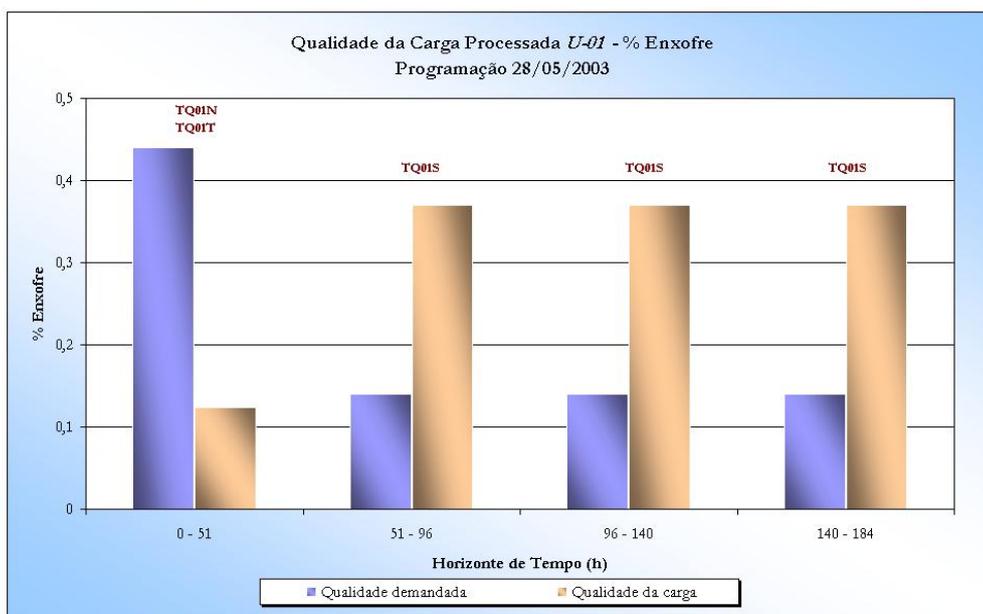


FIGURA 6.6: Enxofre da carga U-01 - 28/05/03

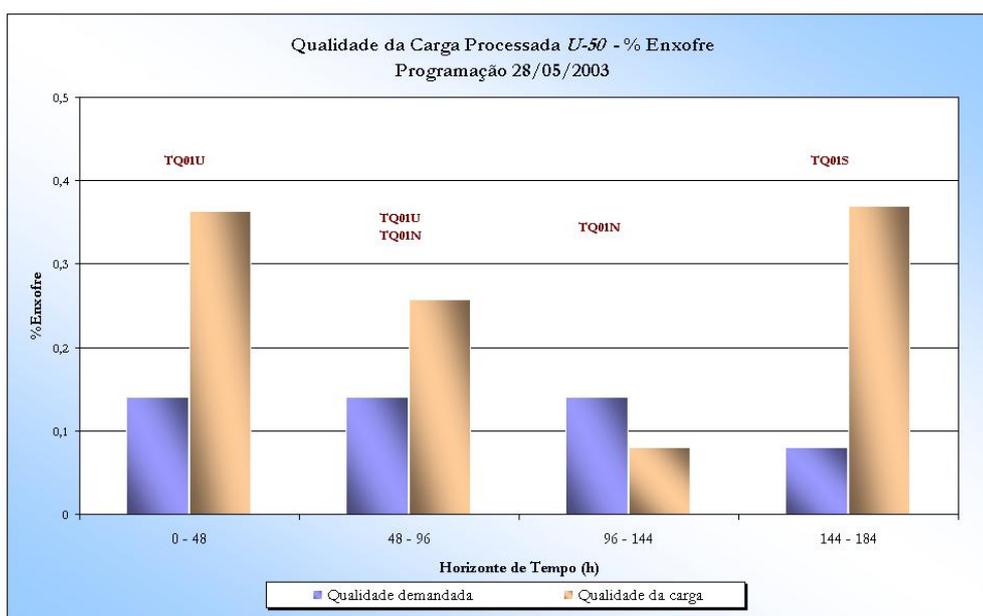


FIGURA 6.7: Enxofre da carga U-50 - 28/05/03

Os gráficos 6.8 e 6.9 apresentam os níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria, ao longo do horizonte de programação. Verifica-se, ao final do horizonte, o volume total de 124.233m³ de óleo na refinaria e 193.200m³ no terminal. Apesar desta situação não corresponder à ideal (volume de óleo no terminal maior que volume de óleo na refinaria), vale ressaltar que nesta instância houve o descarregamento de um navio com 151.000m³ de petróleo às 138 horas do horizonte de programação, o que

impossibilitou a movimentação deste volume (ou parte dele) para a refinaria, uma vez que o descarregamento foi finalizado às 163,17 horas do horizonte, que termina em 184 horas.

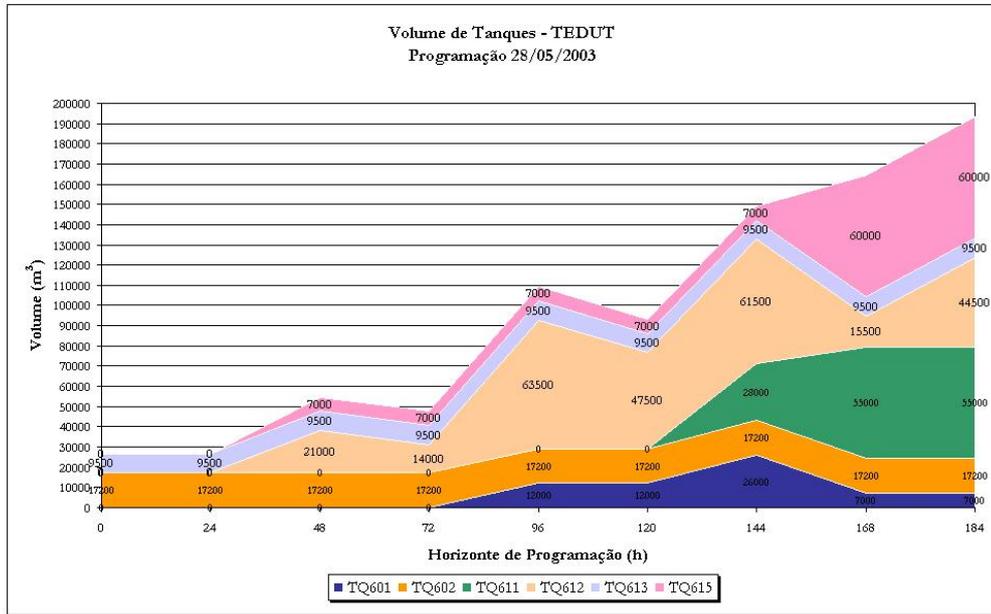


FIGURA 6.8: Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 28/05/03

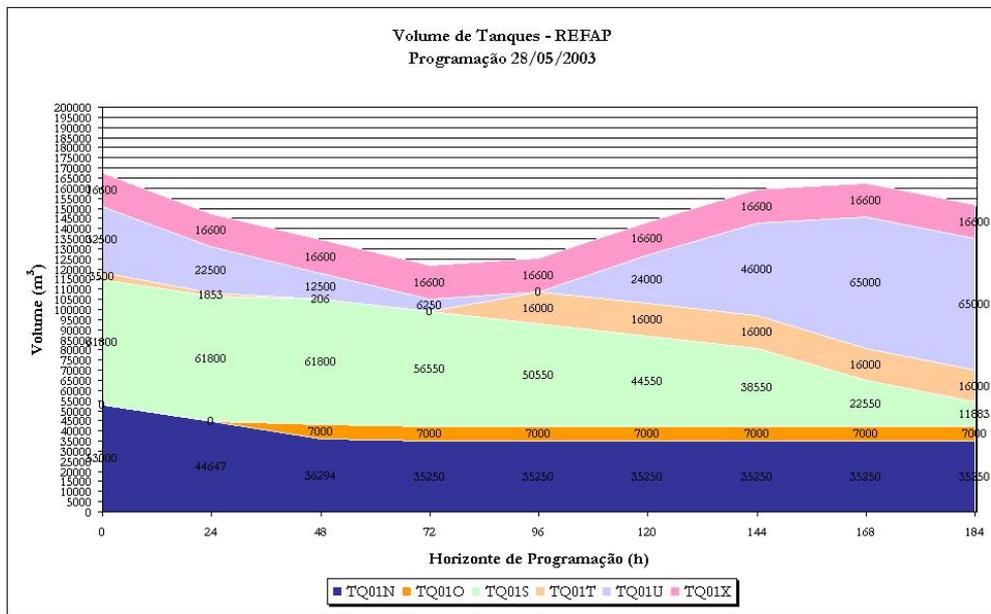


FIGURA 6.9: Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 28/05/03

A tabela 6.13 apresenta o número de trocas de tanques para as demais operações (além da carga das UDAs): durante o descarregamento de navios, o envio de petróleo e o recebimento na refinaria.

TABELA 6.13: Número de trocas de tanques - 28/05/03

TROCA DE TANQUES		
DESCARGA DE NAVIO		4
OPERAÇÃO DUTO	TEDUT	1
	REFAP	2

6.1.3.2 Programação 02/06/03

O gráfico de Gantt para este cenário de programação é mostrado na figura 6.10, a fim de apresentar a seqüência e a duração das tarefas, bem como a utilização dos recursos.

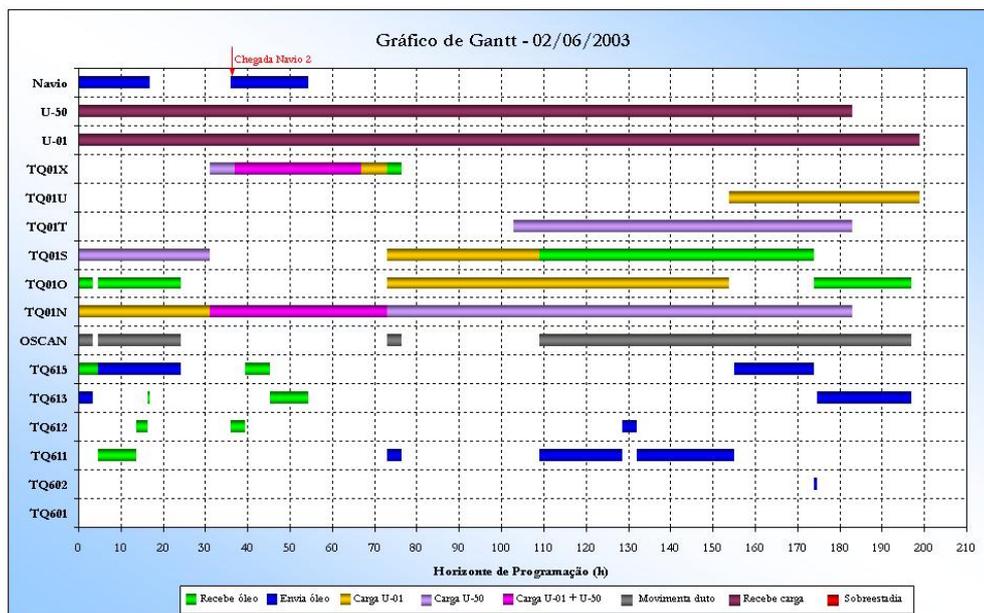


FIGURA 6.10: Gráfico de Gantt - 02/06/03

Através do gráfico de Gantt para esta instância pode-se observar que:

- todo o volume a ser descarregado foi realizado sem sobreestadia para ambos os navios;

- o recurso TQ601 não foi utilizado durante todo o horizonte de programação e o TQ602 teve pouca utilização;
- a carga das unidades de destilação foi distribuída entre todos os tanques da refinaria;
- os tanques TQ01O, TQ01S e TQ01X receberam o volume movimentado no OSCAN;
- as unidades U-01 e U-50 operaram ininterruptamente durante todo o horizonte planejado.

A tabela 6.14 mostra, para cada uma das UDAs, os resultados de atendimento ao volume de carga, apresentando o volume planejado para o horizonte de programação e o volume penalizado para o mesmo período. Na mesma tabela encontra-se o número de trocas de tanques referentes à tarefa de carga das unidades de destilação.

TABELA 6.14: Resultados de Atendimento à Demanda - 02/06/03

UNIDADE	NUM. TROCAS TQS DE CARGA	VOLUME PLANEJADO (m ³)	VOLUME PENALIZADO (m ³)
U-01	4	49.750	5.693
U-50	3	76.250	17.401

Verifica-se para esta instância uma penalização de 23.095m³ no volume de carga processada, devido à diferença de qualidade da carga.

As tabelas 6.15 e 6.16 mostram as informações detalhadas sobre os volumes planejados e programados para cada uma das unidades de destilação.

Verifica-se, na programação da U-01, quatro trocas de tanques: no início da programação a unidade opera com o tanque TQ01N, no instante 37h passa ao par TQ01N e TQ01X, do instante 73 ao 109 opera com os tanques TQ01O e TQ01S, quando muda novamente apenas para o tanque TQ01O e finaliza a programação com o TQ01U. Não há previsão de mudança de campanha para a U-01 durante o horizonte considerado, desta forma, pode-se atribuir as trocas de tanques à falta de volume em tanque ou a busca por carga de melhor qualidade. Para a unidade U-50 observam-se três trocas de tanque, sendo duas delas devido à mudança de campanha nos instantes 31h e 103h. Durante a campanha RAT observa-se uma troca, na qual houve melhora de qualidade da carga.

TABELA 6.15: Informações de programação de carga da U-01 - 02/06/03

PERÍODO		0 - 37	37 - 73	73 - 109	109 - 154	154 - 199
U-01	PRINC	TQ01N	TQ01N	TQ01O	TQ01O	TQ01U
	VAZÃO	5.654	3.000	5.640	5.693	4.914
	AUX	-	TQ01X	TQ01S	-	-
	VAZÃO	-	1.619	41	-	-
	PLAN	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
	PENAL	346	1.381	319	307	1.086
	API	35,251	30,969	34,847	34,900	33,549
	%S	0,079	0,286	0,083	0,080	0,363
	CND	0,026	0,047	0,000	0,000	0,328
	MRL	0,000	0,300	0,004	0,000	0,160

TABELA 6.16: Informações de programação de carga da U-50 - 02/06/03

PERÍODO		0 - 31	31 - 67	67 - 103	103 - 143	143 - 183
U-50	PRINC	TQ01S	TQ01X	TQ01N	TQ01T	TQ01T
	VAZÃO	7.384	3.274	9.935	5.258	5.258
	AUX	-	TQ01N	-	TQ01N	TQ01N
	VAZÃO	-	3.725	-	1.915	1.915
	PLAN	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
	PENAL	2.616	3.001	65	2.827	2.827
	API	29,212	29,550	35,251	29,178	29,178
	%S	0,370	0,354	0,079	0,366	0,366
	CND	0,025	0,053	0,026	0,032	0,032
	MRL	0,386	0,400	0,000	0,400	0,400

A tabela 6.17 apresenta informações detalhadas sobre as tarefas de movimentação de itens de cru para a instância de 02/06/2003.

Nota-se que os dois primeiros itens correspondem ao estoque inicial do duto, demonstrando o bombeamento destes itens para o OSCAN antes do início do horizonte. De maneira similar, os itens 10 e 11 foram os últimos bombeios dos tanques TQ602 e TQ613 e ocuparam completamente o OSCAN até o final do horizonte.

TABELA 6.17: Informações de movimentação de itens de cru - 02/06/03

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	TIE	TFE	TIS	TFS	PETRÓLEO	ORIGEM	DESTINO	VOLUME DESTINO
1	3.400			0	3,4	PENL-100%	OSCAN	TQ010	
2	19.600			4,667	24,267	PENL-100%	OSCAN	TQ010	
3	3.400	0	3,4	73	76,4	BONL-7,9% MR33-88,9% NKOS-3,2%	TQ613	TQ01X	
4	19.600	4,667	24,267	109	128,6	PENL-100%	TQ615	TQ01S	
5	3.400	73	76,4	128,6	132	PENL-100%	TQ611	TQ01S	
6	19.600	109	128,6	132	151,6	PENL-100%	TQ611	TQ01S	
7	3.400	128,6	132	151,6	155	PENL-88,3% BONL-11,7%	TQ612	TQ01S	
8	23.000	132	155	155	174	PENL-100%	TQ611	TQ01S	19.000
					174,6	PENL-100%	TQ611	TQ01O	600
					178	PENL-100%	TQ611	TQ01O	3.400
9	19.000	155	174	178	197	PENL-19,5% BONL-80,5%	TQ615	TQ01O	
10	600	174	174,6			NKOS-14,4% MR33-85,6%	TQ602	OSCAN	
11	22.400	174,6	197			PENL-5,3% BONL-94,7%	TQ613	OSCAN	

Informações complementares sobre a operação do OSCAN encontram-se na tabela 6.18, onde são mostrados os instantes das paradas de operação do duto, a duração de cada uma delas, o tempo total de ociosidade do duto e o percentual de utilização do mesmo.

TABELA 6.18: Informação de utilização de duto - 02/06/03

UTILIZAÇÃO DE DUTO			
PARADA	INÍCIO (h)	FIM (h)	DURAÇÃO
1	3,4	4,67	1,27
2	24,27	73	48,73
3	76,4	109	32,6
4	197	199	2
Tempo total de ociosidade			84,6
% Ociosidade			46,0%
% Utilização do duto			54,0%

O descarregamento dos dois navios foi programado sem gerar custos de sobreestadia e os volumes enviados para os tanques do TEDUT encontram-se na tabela 6.19.

TABELA 6.19: Informações de descarregamento de navio - 02/06/03

NAVIO	VOLUME (m ³)	TID	TFD	PETRÓLEO	LINHA	DESTINO			
						TQ611	TQ612	TQ613	TQ615
1	101.000	0,0	16,8	PENL	N + S	55.000	29.000	3.000	14.000
						TQ612	TQ613	TQ615	N + S
2	110.000	36,0	54,3	BONL	N + S	7.400	54.000	34.600	14.000
						TQ612	TQ613	TQ615	N + S

Os gráficos 6.11 e 6.12 apresentam os valores de volume planejado e de volume programado para a U-01 e U-50, respectivamente, com as indicações dos tanques de carga utilizados em cada período. A visualização dos dados de qualidade de carga pode ser feita através dos gráficos 6.13 e 6.14 para densidade API e 6.15 e 6.16 para o teor de enxofre.

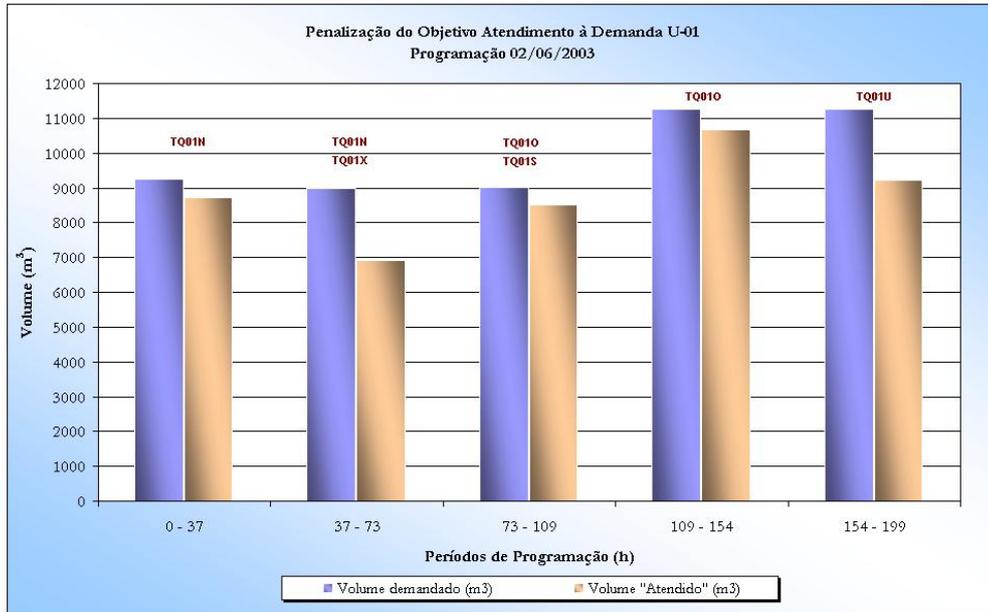


FIGURA 6.11: Atendimento ao volume planejado U-01 - 02/06/03

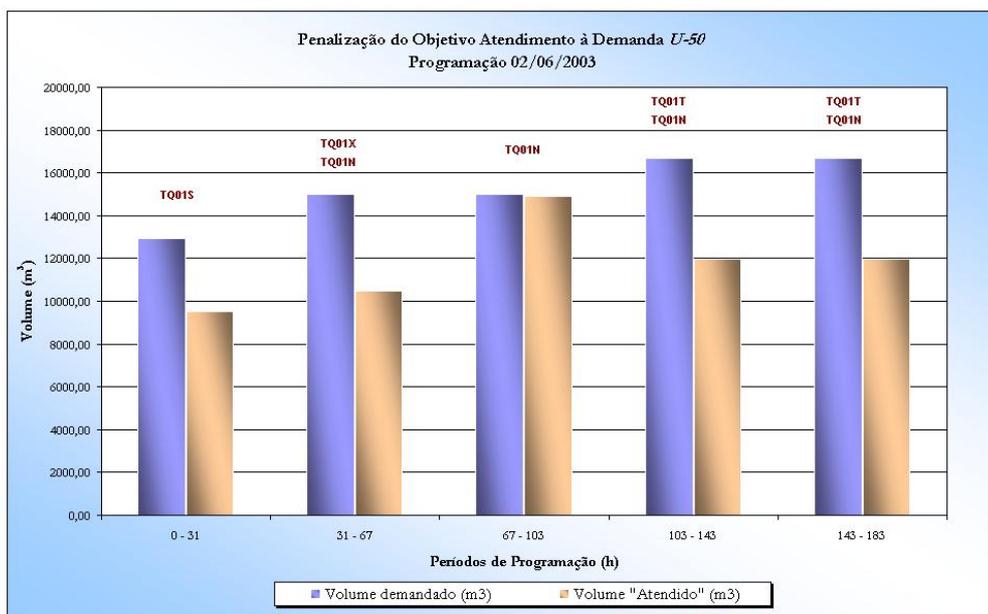


FIGURA 6.12: Atendimento ao volume planejado U-50 - 02/06/03

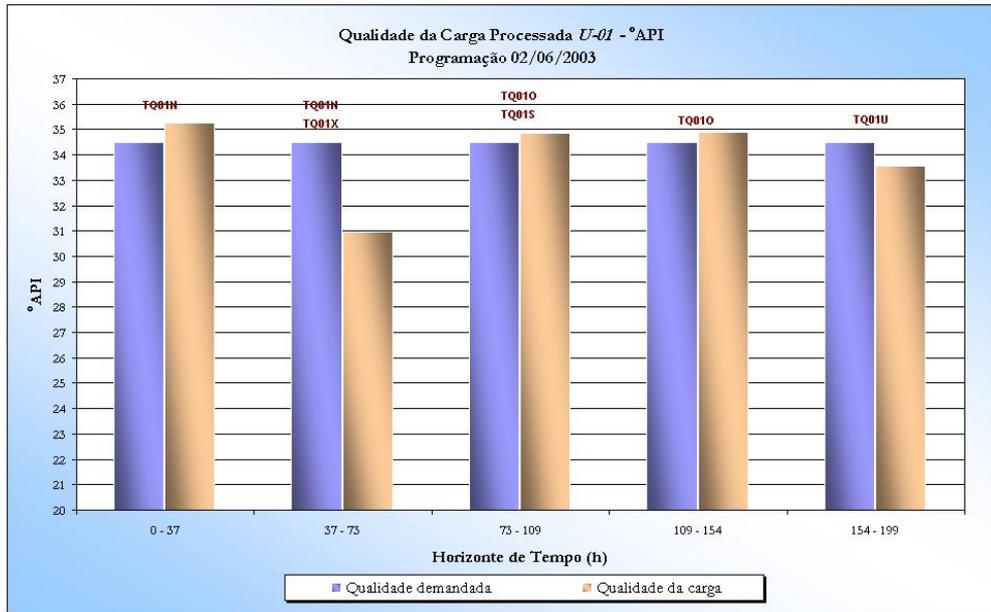


FIGURA 6.13: API da carga U-01 - 02/06/03

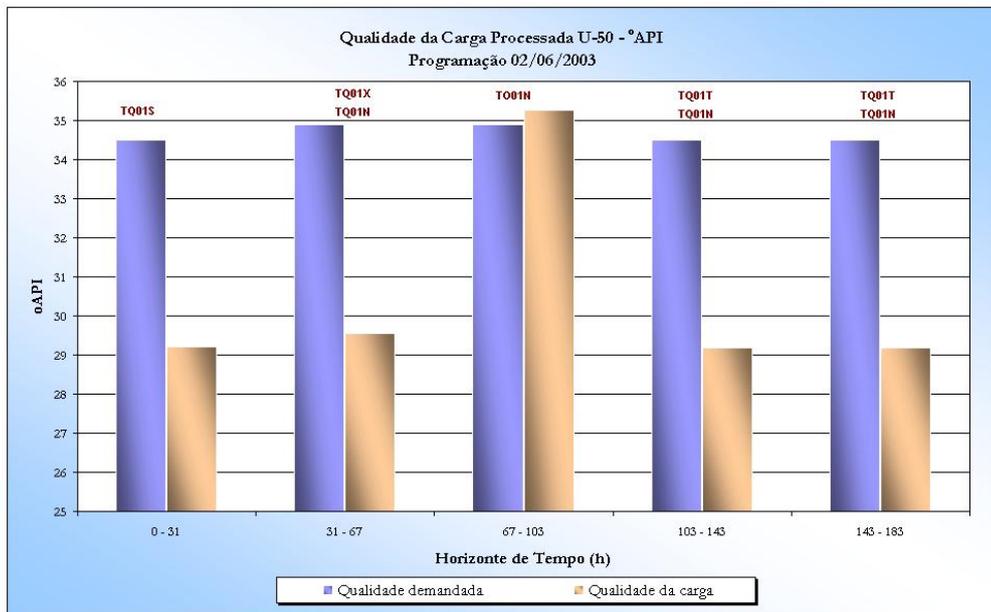


FIGURA 6.14: API da carga U-50 - 02/06/03

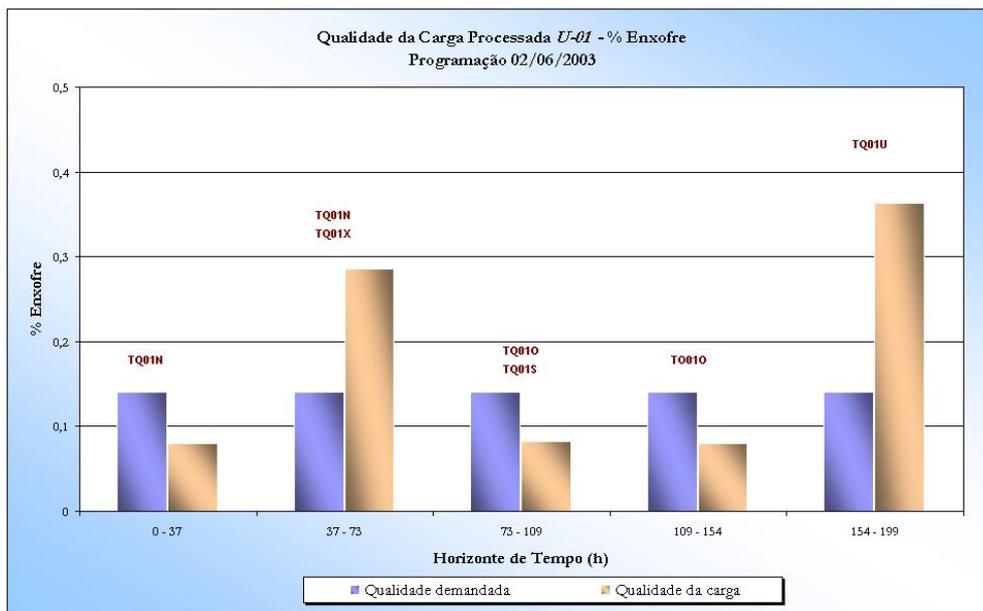


FIGURA 6.15: Enxofre da carga U-01 - 02/06/03

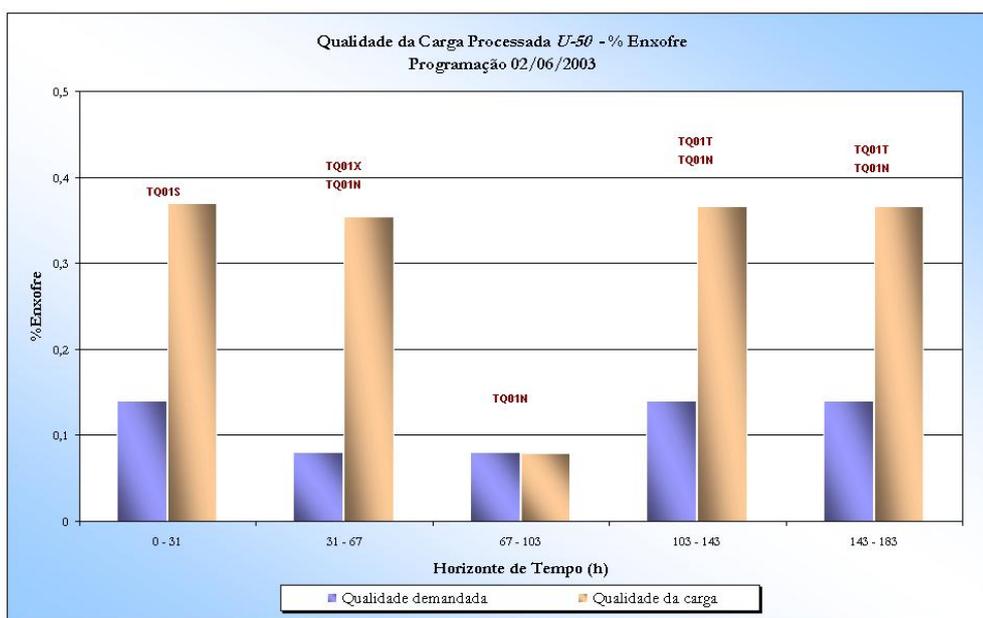


FIGURA 6.16: Enxofre da carga U-50 - 02/06/03

Os gráficos 6.17 e 6.18 apresentam os níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria, ao longo do horizonte de programação. Verifica-se, ao final do horizonte, o volume total de 108.100m³ de óleo na refinaria e 151.300m³ no terminal. Nota-se também, para esta instância, grande volume de óleo a ser descarregado (211.000m³).

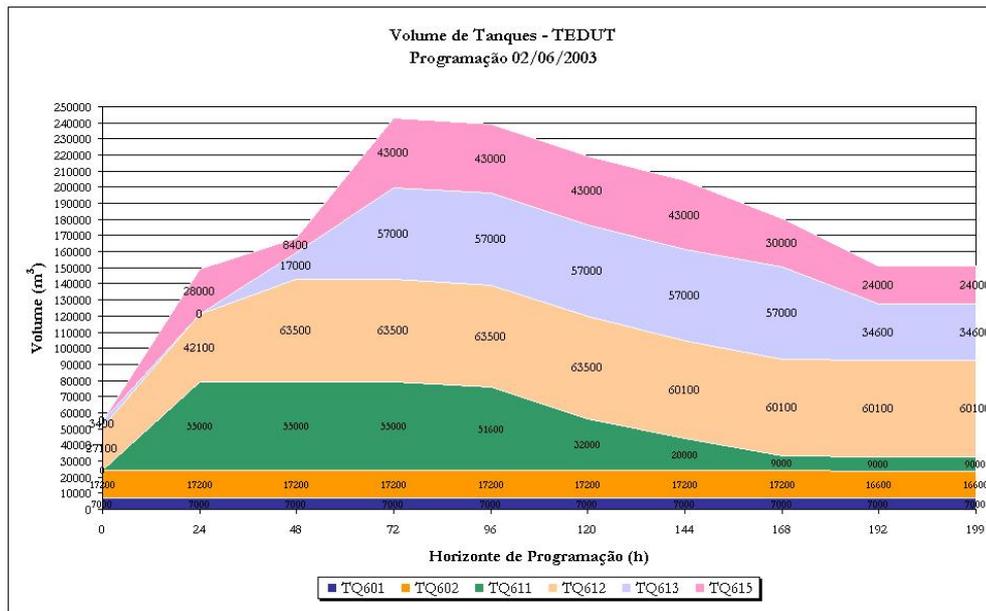


FIGURA 6.17: Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 02/06/03

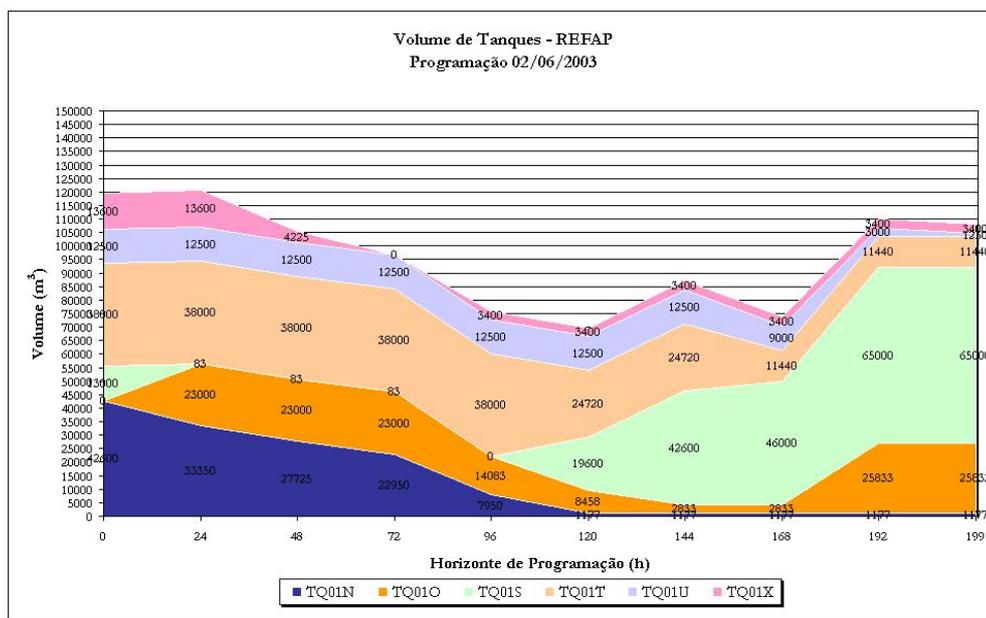


FIGURA 6.18: Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 02/06/03

Analogamente ao caso mostrado na seção anterior, a tabela 6.20 apresenta o número de trocas de tanques para as demais operações (além da carga das UDAs): durante o descarregamento de navios, o envio de petróleo e o recebimento na refinaria.

TABELA 6.20: Número de trocas de tanques - 02/06/03

TROCA DE TANQUES		
DESCARGA DE NAVIO		5
OPERAÇÃO DUTO	TEDUT	7
	REFAP	3

6.1.3.3 Programação 02/07/03

O gráfico de Gantt para este cenário de programação é mostrado na figura 6.19.

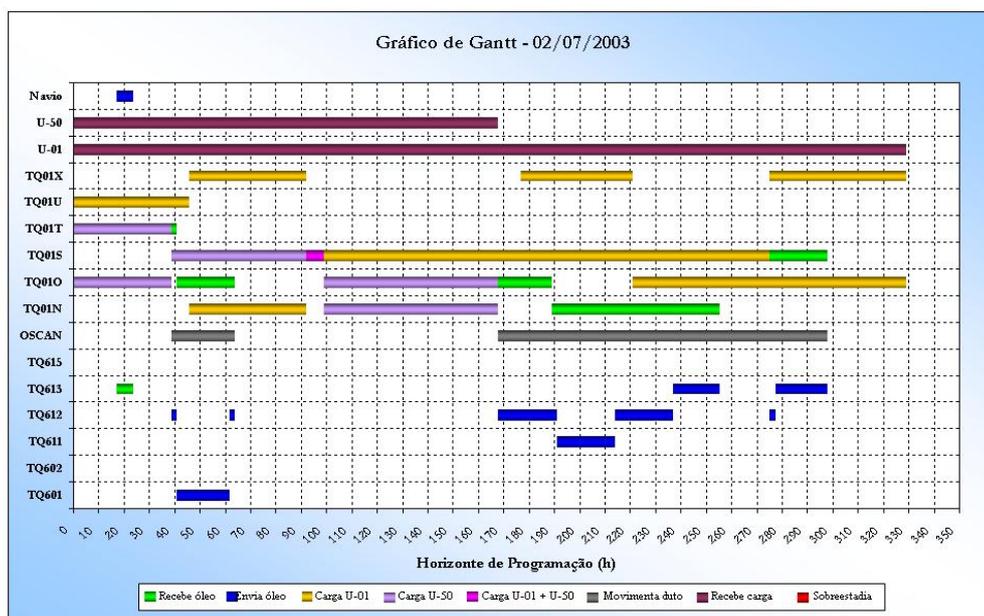


FIGURA 6.19: Gráfico de Gantt - 02/07/03

As seguintes observações podem ser feitas através do gráfico de Gantt, para esta instância:

- a tarefa de descarregamento do navio foi realizada sem interrupções e dentro do intervalo de tempo disponível para esta operação, sendo todo o volume descarregado para o tanque TQ613 (vazio no momento do início da tarefa);
- os tanques TQ602 e TQ615 permaneceram ociosos durante todo o intervalo de programação, ou seja, o modelo não definiu nenhuma tarefa para estes recursos;
- todos os tanques da refinaria foram utilizados durante o horizonte de programação;

- as unidades U-01 e U-50 operaram ininterruptamente durante todo o horizonte planejado;
- foram programadas cinco trocas de tanques de carga para a U-01 durante as 329 horas de planejamento e duas para a U-50 durante 168 horas;
- sete trocas de tanque durante o envio de petróleo do TEDUT para a REFAP;
- os tanques TQ01T, TQ01O, TQ01N e TQ01S receberam todo o volume movimentado no OSCAN, acarretando em três trocas no recebimento de óleo na refinaria.

A tabela 6.21 mostra, para cada uma das UDAs, os resultados de atendimento ao volume de carga, apresentando o volume planejado para o horizonte de programação e o volume penalizado para o mesmo período. Na mesma tabela encontra-se o número de trocas de tanques referentes à tarefa de carga das unidades de destilação.

TABELA 6.21: Resultados de Atendimento à Demanda - 02/07/03

UNIDADE	NUM. TROCAS TQS DE CARGA	VOLUME PLANEJADO (m ³)	VOLUME PENALIZADO (m ³)
U-01	5	82.250	18.577
U-50	2	68.375	6.518

Os resultados obtidos para o cenário de 02/07/2003 apontam uma “perda” de 23.024m³, devido à carga “fora de especificação”.

TABELA 6.22: Informações de programação de carga da U-01 - 02/07/03

PERÍODO	0 - 46	46 - 92	92 - 178	178 - 221	221 - 275	275 - 329	
U-01	PRINC	TQ01U	TQ01X	TQ01S	TQ01S	TQ01O	TQ01O
	VAZÃO	4.914	3.015	4.628	2.911	4.359	3.345
	AUX	-	TQ01N	-	TQ01X	TQ01S	TQ01X
	VAZÃO	-	1.226	-	1.332	815	1.383
	PLAN	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
	PENAL	1.086	2.985	1.372	3.089	1.641	2.655
	API	33,549	28,170	29,711	28,368	31,618	30,061
	%S	0,363	0,388	0,337	0,392	0,258	0,322
	CND	0,000	0,420	0,000	0,000	0,000	0,000
	MRL	0,328	0,42	0,328	0,420	0,197	0,304

TABELA 6.23: Informações de programação de carga da U-50 - 02/07/03

PERÍODO		0 - 39	39 - 99	99 - 168
U-50	PRINC	TQ01O	TQ01S	TQ01O
	VAZÃO	7.286	7.713	8.548
	AUX	TQ01T	-	TQ01N
	VAZÃO	1.222	-	1.452
	PLAN	9.000	10.000	10.000
	PENAL	492	2.287	0
	API	33,851	29,711	34,900
	%S	0,129	0,337	0,080
	CND	0,000	0,000	0,000
	MRL	0,045	0,328	0,000

As tabelas 6.22 e 6.23 mostram as informações detalhadas sobre os volumes planejados e programados para cada uma das unidades de destilação. As linhas PRINC e AUX indicam os tanques escolhidos como principal e auxiliar, respectivamente, para alimentar as unidades durante os períodos mostrados na primeira linha da tabela. Nas linhas VAZÃO encontram-se os valores de “vazão atendida” para o referido período (em m³/dia) e nas linhas PLAN e PENAL, as vazões planejada e penalizada (também medidas em m³/dia), respectivamente. Finalmente, os valores de API, teor de enxofre e a fração dos petróleos limitantes encontram-se nas linhas API, %S, CND e MRL.

Verificam-se, na programação da U-01, cinco trocas de tanques: do TQ01U para o par TQ01X e TQ01N no instante 46h, no instante 92h ocorre a troca para o tanque TQ01S, o qual permanece em carga durante as próximas 86 horas em seguida os pares TQ01S e TQ01X, TQ01O e TQ01S, TQ01O e TQ01X são selecionados nos instantes 178h, 221h e 275h, respectivamente. A U-50 iniciou sua carga com o par de tanques TQ01O e TQ01T, os quais permanecem como carga até o instante 39h, quando é requerida uma troca de campanha e a unidade passa a operar com o tanque TQ01S pelas próximas 60 horas. No instante 99h novamente há troca de campanha e a U-50 volta a operar com a exigência de carga mais conservadora, igual a do início do horizonte (ver tabela A.23), exigindo um tanque (ou uma combinação de tanques) com mistura de óleos de melhor qualidade, sendo assim, até o final do horizonte a unidade opera com o par TQ01O e TQ01N.

Observa-se ainda através das tabelas 6.22 e 6.23 as tentativas do AG em buscar uma solução de qualidade durante o horizonte de programação, visando melhorar o resultado da função de avaliação.

TABELA 6.24: Informações de movimentação de itens de cru - 02/07/03

ITEM DE CRU	VOLUME m ³	TIE	TFE	TIS	TFS	PETRÓLEO	ORIGEM	DESTINO
1	2.000			39	41	BONL-68,6% MR33-31,4%	OSCAN	TQ01T
2	21.000			41	62	PENL-100%	OSCAN	TQ01O
3	2.000	39	41	62	64	PENL-100%	TQ612	TQ01O
4	21.000	41	62	168	189	BONL-82,7% MR33-17,3%	TQ601	TQ01O
5	2.000	62	64	189	191	PENL-100%	TQ612	TQ01N
6	23.000	168	191	191	214	PENL-100%	TQ612	TQ01N
7	23.000	191	214	214	237	PENL-100%	TQ611	TQ01N
8	18.500	214	232,5	237	255,5	PENL-100%	TQ612	TQ01N
9	2.500	232,5	235	275	277,5	PENL-100%	TQ612	TQ01S
10	2.000	235	237	277,5	279,5	PENL-100%	TQ612	TQ01S
11	18.500	237	255,5	279,5	298	PENL-100%	TQ613	TQ01S
12	2.500	275	277,5			PENL-100%	TQ612	OSCAN
12	20.500	277,5	298			PENL-100%	TQ613	OSCAN

A tabela 6.24 apresenta informações detalhadas sobre as tarefas de movimentação de itens de cru. As colunas TIE e TFE correspondem aos instantes nos quais o item de cru inicia e termina sua ENTRADA no duto, respectivamente; enquanto as colunas TIS e TFS correspondem aos instantes de início e fim de SAÍDA do duto, respectivamente. A coluna PETRÓLEO mostra os óleos componentes daquele item e suas respectivas composições. As colunas ORIGEM e DESTINO indicam, respectivamente, o tanque do qual o item é oriundo no terminal e no qual o mesmo é recebido na refinaria.

Nota-se que os dois primeiros itens correspondem ao estoque inicial do duto, demonstrando o bombeamento destes itens para o OSCAN antes do início do horizonte. De maneira similar, os itens 11 e 12 foram os últimos bombeios dos tanques TQ612 e TQ613 e ocuparam completamente o OSCAN até o final do horizonte.

Informações complementares sobre a operação do OSCAN encontram-se na tabela 6.25, onde são mostrados os instantes das paradas de operação do duto, a duração de

TABELA 6.25: Informação de utilização de duto - 02/07/03

UTILIZAÇÃO DE DUTO			
PARADA	INÍCIO (h)	FIM (h)	DURAÇÃO
1	0	39	39
2	64	168	104
3	255,5	275	19,5
4	298	329	31
Tempo total de ociosidade			193,5
% Ociosidade			58,8%
% Utilização do duto			41,2%

cada uma delas, o tempo total de ociosidade do duto e o percentual de utilização do mesmo.

TABELA 6.26: Informações de descarregamento de navio - 02/07/03

NAVIO	VOLUME (m ³)	TID	TFD	PETRÓLEO	LINHA	DESTINO
1	40.000	17,0	23,7	PENL	N + S	TQ613
						40.000

Neste cenário existe apenas um navio, com volume de 40.000 m³, para ser descarregado. A tabela 6.26 mostra as informações relevantes do descarregamento dos “lotes” do navio. As colunas TID e TFD indicam os instantes inicial e final, respectivamente, do descarregamento dos lotes. A coluna LINHA mostra qual(is) a(s) linha(s) submarina(s) utilizada(s) para o descarregamento (N - Norte, S - Sul). A linha submarina, assim como o duto, é considerada um dispositivo de volume fixo, neste caso 7.000 m³, logo após cada descarregamento de navio, cada uma das linhas “retém” este volume, o qual só é bombeado no descarregamento seguinte. Portanto, verifica-se que o primeiro lote bombeado para o tanque TQ613 a partir do início do descarregamento refere-se ao volume estocado na linha, apresentado na tabela A.22 e o último lote do petróleo PENL, proveniente do navio descarregado neste cenário, permanece na linha até que ocorra nova programação de descarregamento.

As observações listadas acima podem ser melhor visualizadas através dos gráficos a seguir.

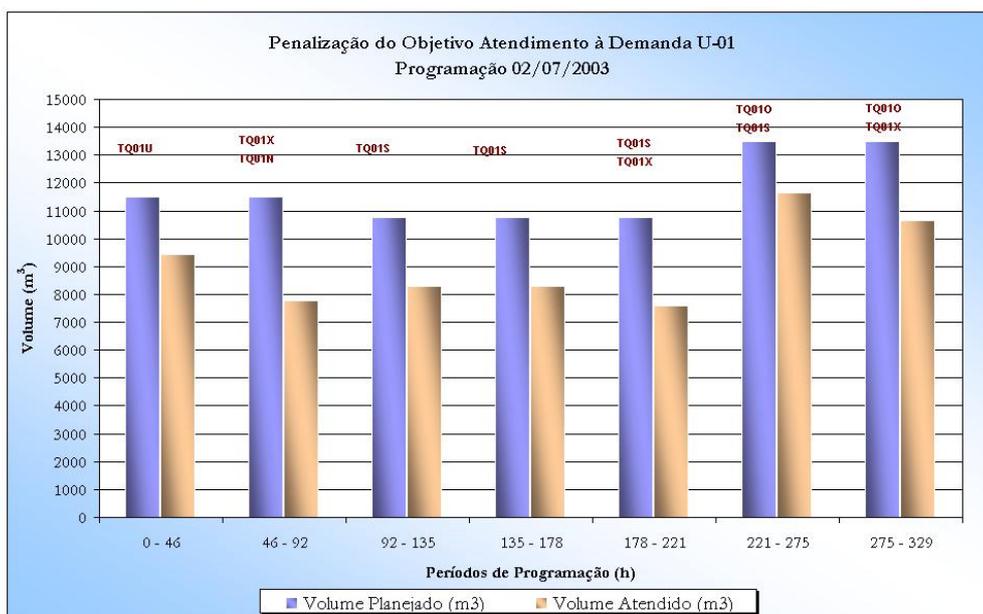


FIGURA 6.20: Atendimento ao volume planejado U-01 - 02/07/03

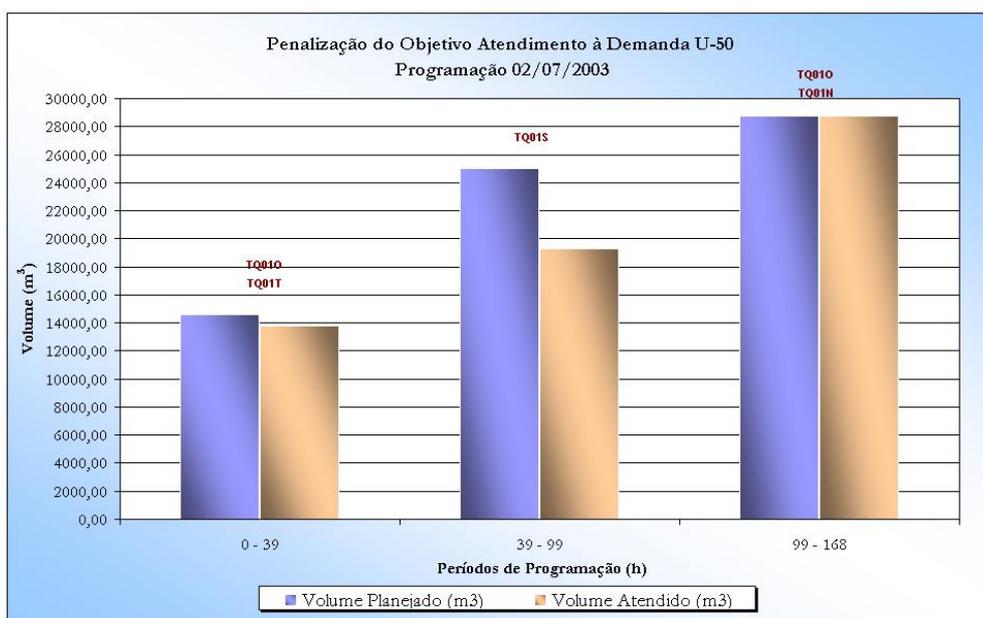


FIGURA 6.21: Atendimento ao volume planejado U-50 - 02/07/03

Os gráficos 6.20 e 6.21 apresentam os valores de volume planejado e de volume programado para a U-01 e U-50, respectivamente, com as indicações dos tanques de carga utilizados em cada período. A visualização dos dados de qualidade de carga pode ser feita através dos gráficos 6.22 e 6.23 para densidade API e 6.24 e 6.25 para o teor de enxofre.

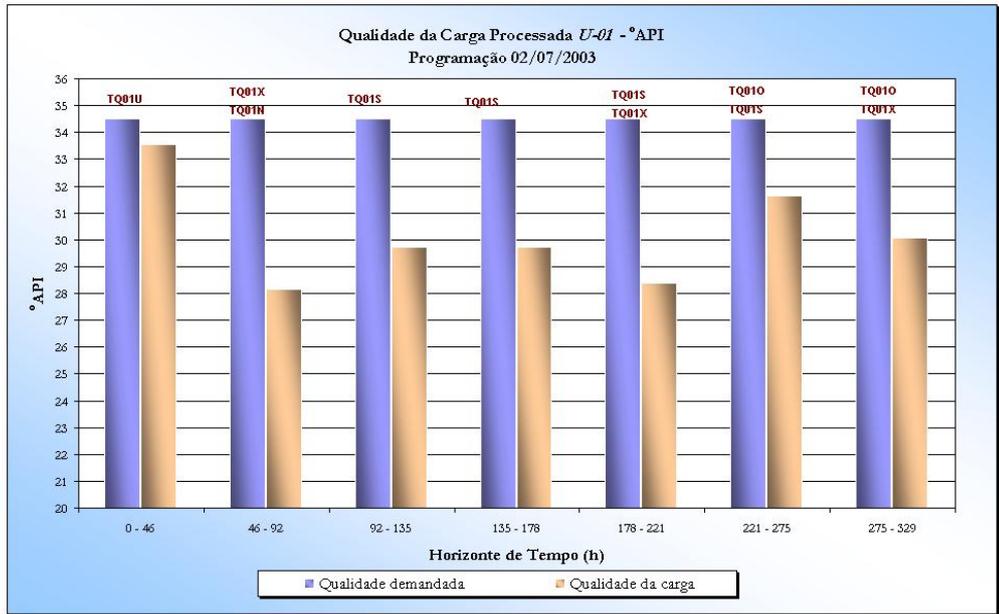


FIGURA 6.22: API da carga U-01 - 02/07/03

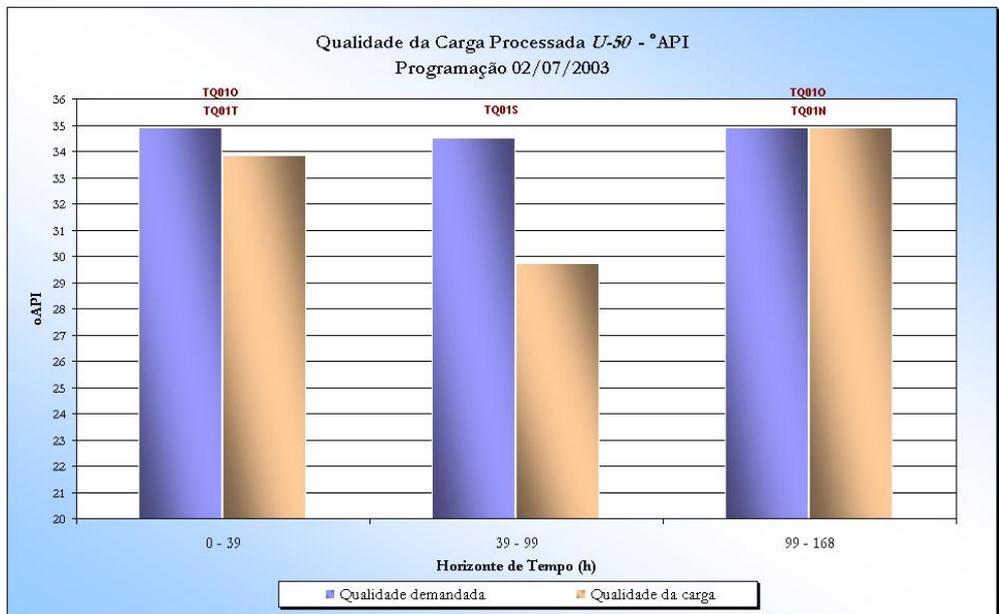


FIGURA 6.23: API da carga U-50 - 02/07/03

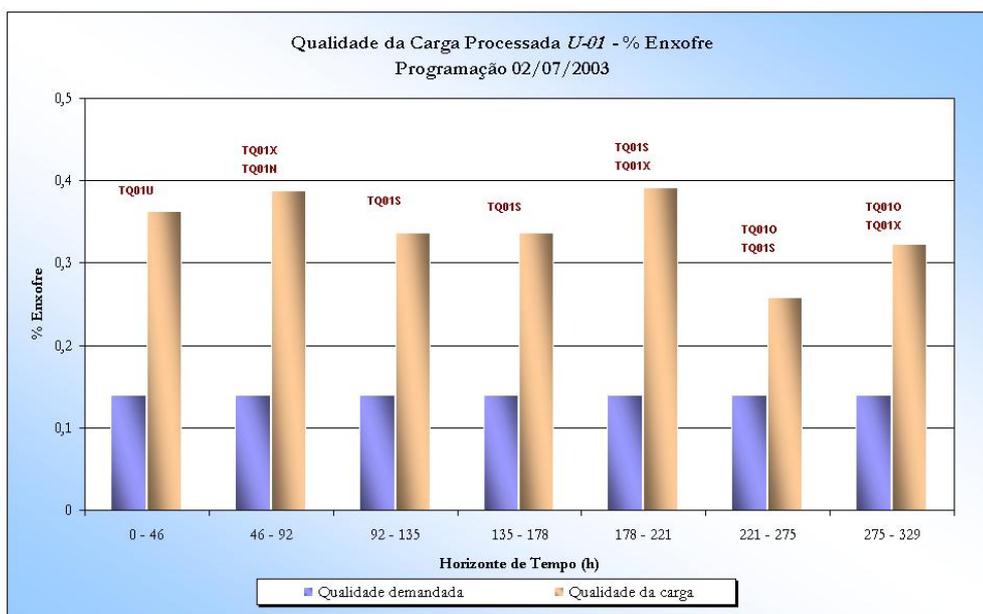


FIGURA 6.24: Enxofre da carga U-01 - 02/07/03

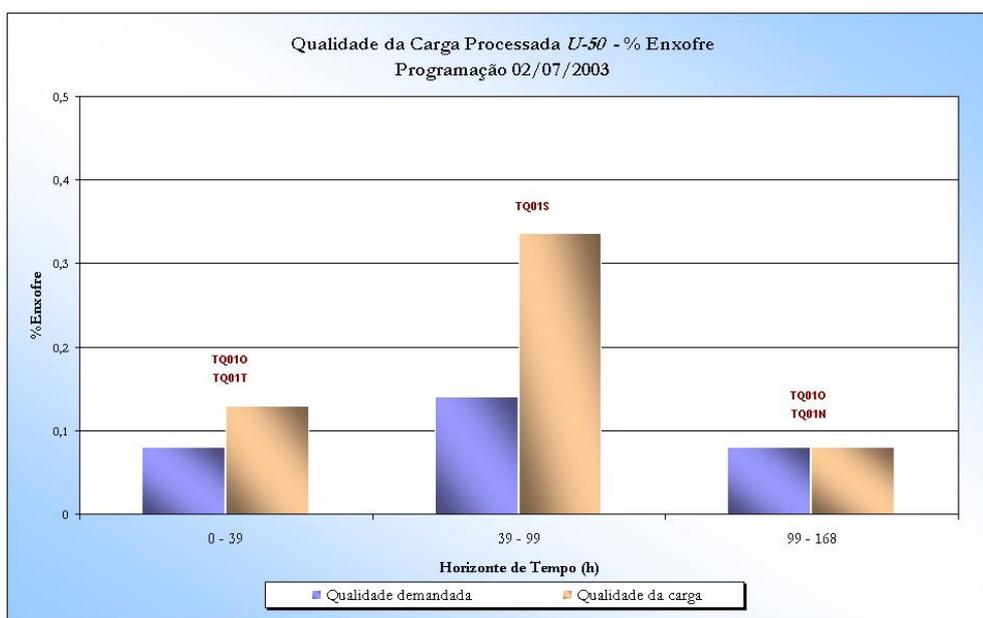


FIGURA 6.25: Enxofre da carga U-50 - 02/07/03

Os gráficos 6.26 e 6.27 apresentam os níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria, ao longo do horizonte de programação. Verifica-se que ao final do horizonte a refinaria possui mais volume de óleo (93.575m^3) do que o terminal (65.500m^3).

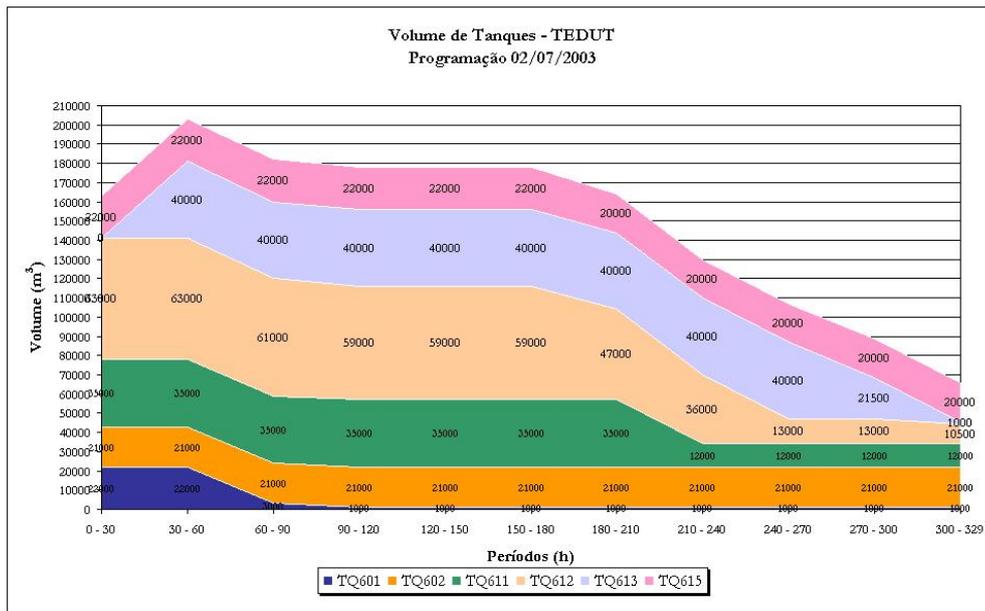


FIGURA 6.26: Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 02/07/03

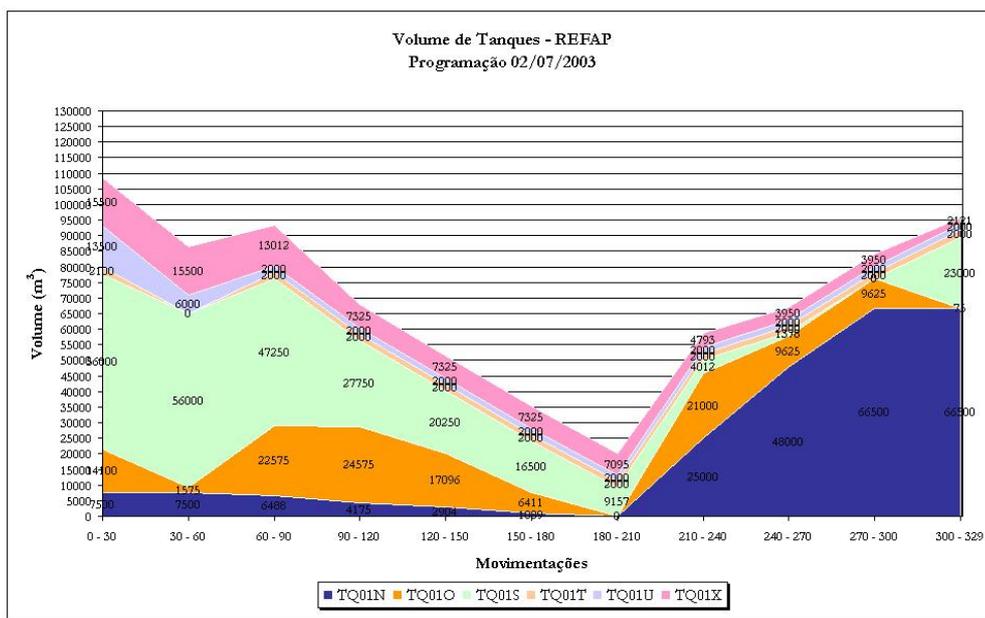


FIGURA 6.27: Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 02/07/03

A tabela 6.27 apresenta o total de trocas de tanques para cada uma das demais operações.

TABELA 6.27: Número de trocas de tanques - 02/07/03

TROCA DE TANQUES		
DESCARGA DE NAVIO		0
OPERAÇÃO DUTO	TEDUT	7
	REFAP	3

6.2 Comparação de Resultados

Com o objetivo de avaliar as soluções obtidas com o modelo de algoritmos genéticos, realizou-se uma comparação destas com os resultados obtidos em (MAGALHÃES 2004) para todas as instâncias. Para a instância de 02/07/2003, em particular, utilizou-se também a solução adotada pelo programador da refinaria e a comparação foi realizada utilizando-se as três soluções.

Vale ressaltar que algumas premissas e aproximações feitas nesta dissertação diferem daquelas adotadas no trabalho supra citado. A tabela 6.28 apresenta as principais características dos modelos.

Em função das diferentes premissas adotadas nos trabalhos, optou-se pela análise comparativa apenas nos seguintes itens:

- número de trocas de tanques;
- paradas de operação do duto (% de tempo ocioso);
- volume final dos tanques de petróleo (TEDUT e REFAP).

Os resultados de número de trocas de tanques utilizados para a comparação correspondem ao horizonte de sete dias (0h a 168h) para todas as instâncias.

TABELA 6.28: Características básicas dos modelos

		Modelo AG	Modelo MINLP
PETRÓLEO	CLASSIFICAÇÃO	Características (API e %S)	Família (Tipo de óleo)
	CÁLCULO DE MISTURA	Sim	Sim
	DEGRADAÇÃO	Não	Sim
UDA	CAMPANHA	Característica da carga	Família de petróleo
	RESTRIÇÃO DE CARGA	Por petróleo	Por família
TANQUES	OPERAÇÃO	Recebendo Enviando Ocioso	Recebendo Enviando Ocioso
	ARMAZENAMENTO	Independente	Por família (Serviço de Tanque)
	REPOUSO	Sim (24h)	Sim (24h)
DUTO	VAZÃO	Constante	Considera horários de pico
FUNÇÃO DE AVALIAÇÃO	NÚMERO DE TROCAS DE TANQUES	Agregado	Desagregado

6.2.1 Programação 28/05/03

O gráfico apresentado na figura 6.28 compara os resultados para o número de trocas de tanques, discriminados por tipo de tarefa: carga da U-01, carga da U-50, descarregamento de navio e operação do OSCAN (envio - TEDUT e recebimento - REFAP). Observa-se um bom desempenho do algoritmo genético, que forneceu os melhores resultados para as operações de descarga de navio e envio de petróleo do TEDUT para a REFAP (operação do duto). Para as demais tarefas o AG apresentou, para esta instância resultado igual ao modelo contínuo MINLP.

Uma das parcelas da função de avaliação do modelo de algoritmo genético é a minimização do tempo de ociosidade do recurso OSCAN. O resultado do modelo de AG apontou ociosidade do duto durante 52,2% do horizonte considerado, enquanto que a solução do modelo não linear apresenta 63,4% do tempo de operação ocioso, como mostra o gráfico da figura 6.29. Entretanto, vale ressaltar que o modelo matemático não busca a minimização do tempo ocioso de duto.

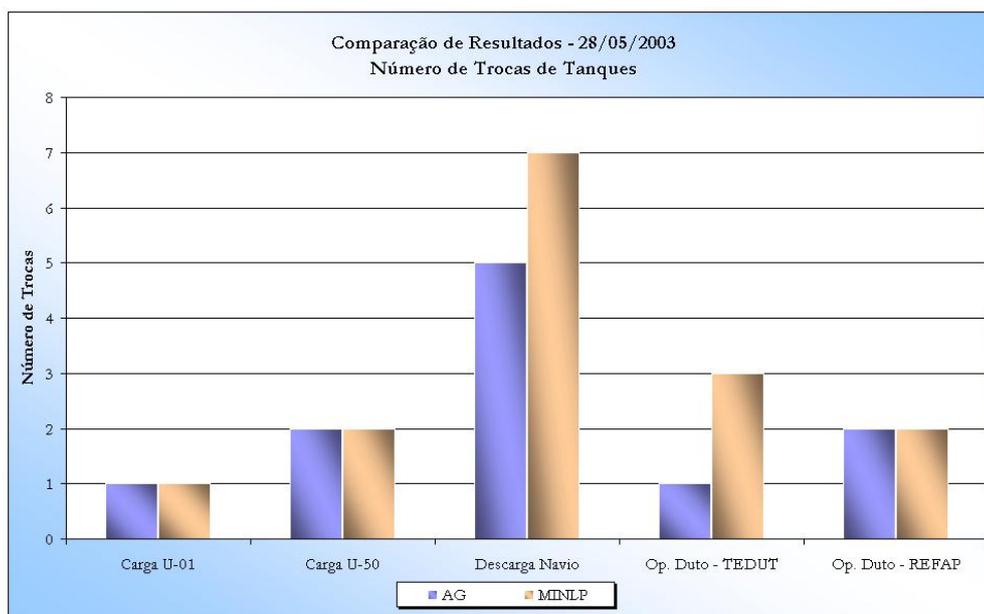


FIGURA 6.28: Comparação Número de Trocas de Tanques - 28/05/2003

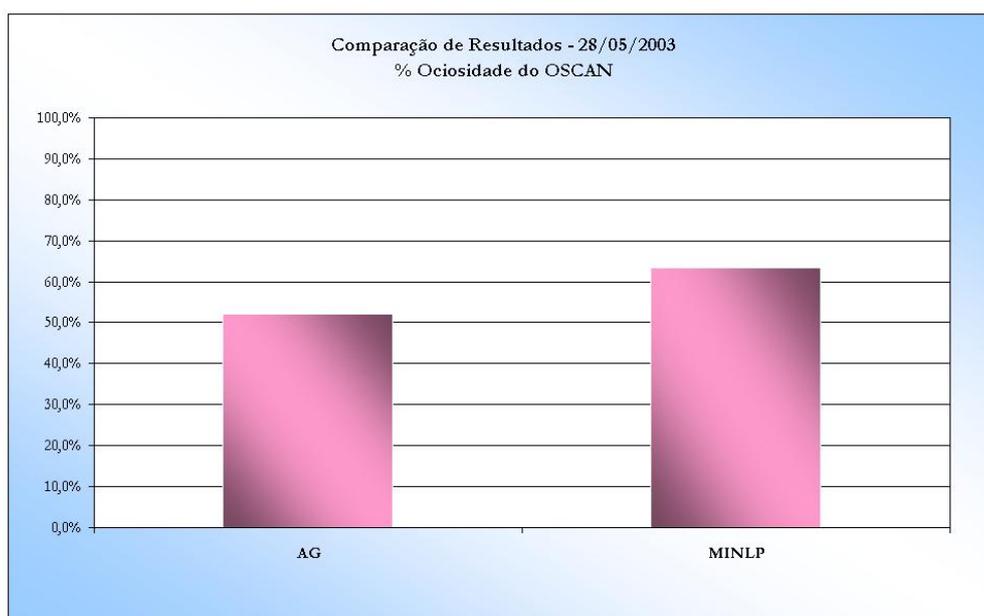


FIGURA 6.29: Comparação Ociosidade do OSCAN - 28/05/2003

Outra observação interessante é o acompanhamento dos níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria e, conseqüentemente, o perfil resultante destes volumes ao final do horizonte de programação. Considera-se como situação ideal níveis de estoque maiores na refinaria do que no terminal, uma vez que o recebimento e a movimentação do petróleo, desde o descarregamento até a entrada na refinaria, enfrentam desafios que podem atrasar este procedimento.

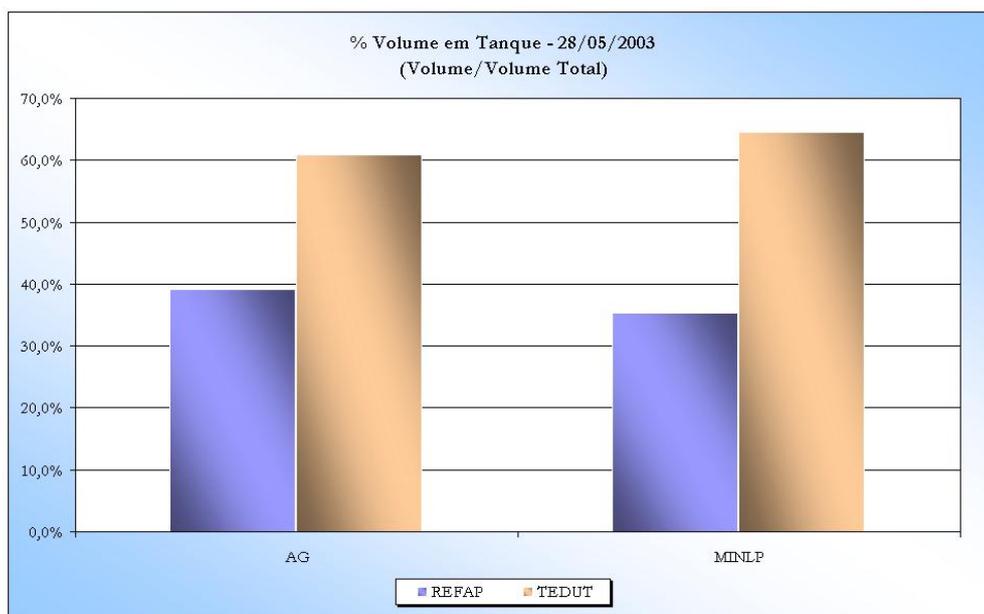


FIGURA 6.30: Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 28/05/2003

O gráfico 6.30 tem como objetivo mostrar o perfil dos níveis de estoque ao final do horizonte de programação para as soluções comparadas. Os valores representam o percentual de volume em tanque no terminal e na refinaria, ou seja, a relação entre o volume armazenado (TEDUT ou REFAP) e o volume total (TEDUT e REFAP).

Verifica-se, em ambas as soluções, que o estoque de petróleo no final do horizonte de programação é maior no terminal que na refinaria. Conforme mencionado anteriormente, esta instância exige o descarregamento de um grande volume de óleo próximo ao final do horizonte (151.000m^3 , no instante 138h), acarretando no maior armazenamento nos tanques do TEDUT.

6.2.2 Programação 02/06/03

De maneira análoga, o gráfico apresentado na figura 6.31 compara os resultados para o número de trocas de tanques. Verifica-se bom desempenho do AG para as trocas relativas às tarefas de descarregamento de navio e de operação de duto. As trocas durante as tarefas de carga das unidades de destilação apresentaram, para esta instância, desempenho inferior àquele apresentado por (MAGALHÃES 2004).

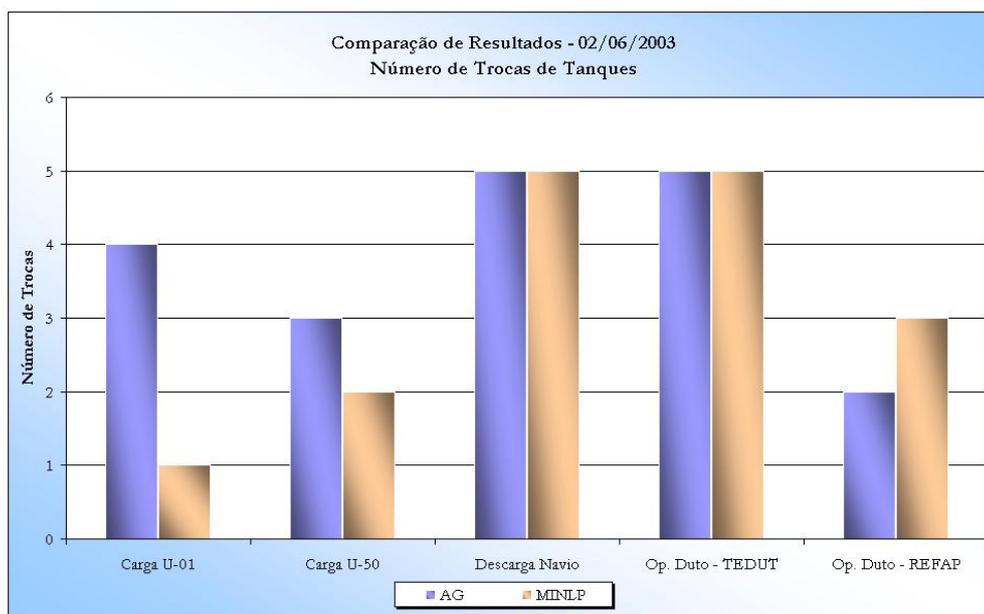


FIGURA 6.31: Comparação Número de Trocas de Tanques - 02/06/2003

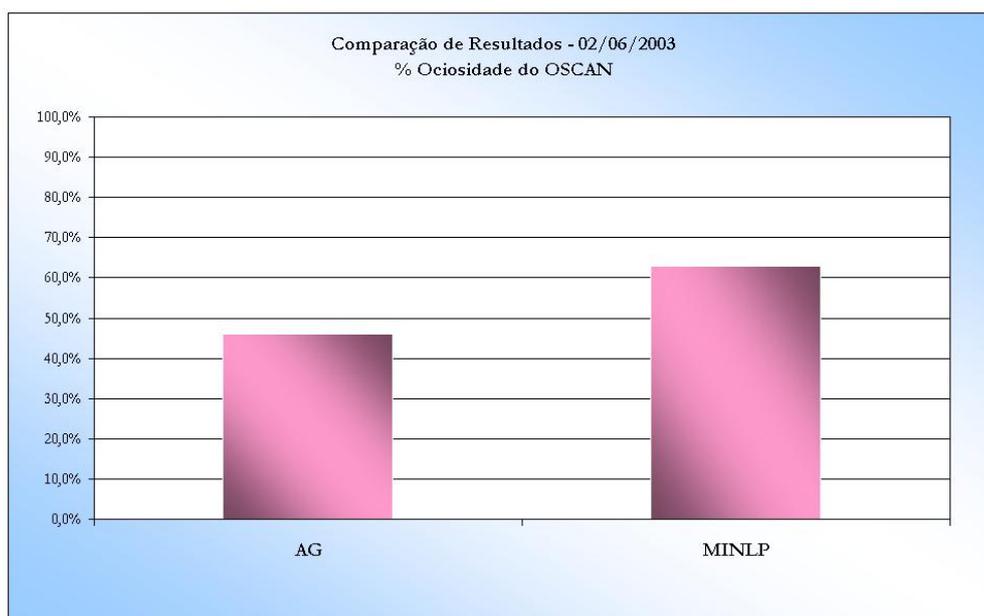


FIGURA 6.32: Comparação Ociosidade do OSCAN - 02/06/2003

Já para a tarefa de operação do oleoduto o modelo de AG apresentou-se superior, com um resultado de 46,0% de tempo ocioso de duto, contra 62,9% da outra solução, como mostra a figura 6.32.

Nesta instância o volume final de petróleo também é maior no terminal que na refinaria, como pode ser visto no gráfico 6.33 para as duas soluções.

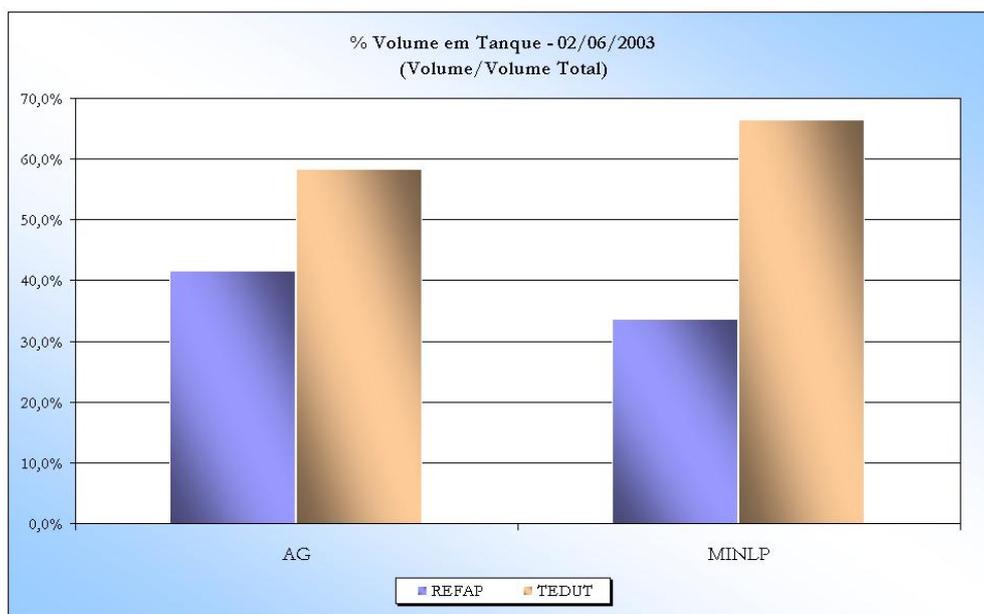


FIGURA 6.33: Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 02/06/2003

6.2.3 Programação 02/07/03

O gráfico apresentado na figura 6.34 compara os resultados para o número de trocas de tanques, discriminados por tipo de tarefa: carga da U-01, carga da U-50, descarregamento de navio e operação do OSCAN (envio - TEDUT e recebimento - REFAP). Observa-se um bom desempenho do algoritmo genético, que forneceu os melhores resultados para as operações de descarga de navio e recebimento de petróleo na refinaria (operação do duto). Os valores de número de trocas de tanques do modelo de AG mostrados no gráfico 6.34 referem-se às trocas observadas até o instante 168h, pois dispunha-se apenas destes dados para os resultados do modelo não linear e da solução da REFAP.

Uma das parcelas da função de avaliação do modelo de algoritmo genético é a minimização do tempo de ociosidade do recurso OSCAN, o resultado do modelo apontou ociosidade do duto durante 58,8% do horizonte considerado, enquanto que as soluções do programador e do modelo não linear forneceram o valor 60,2% para esta avaliação, como mostra o gráfico da figura 6.35.

O perfil de estoque final para esta instância mostrou-se satisfatório, com volume de óleo maior na área de estocagem da refinaria, conforme mostrado na figura 6.36.

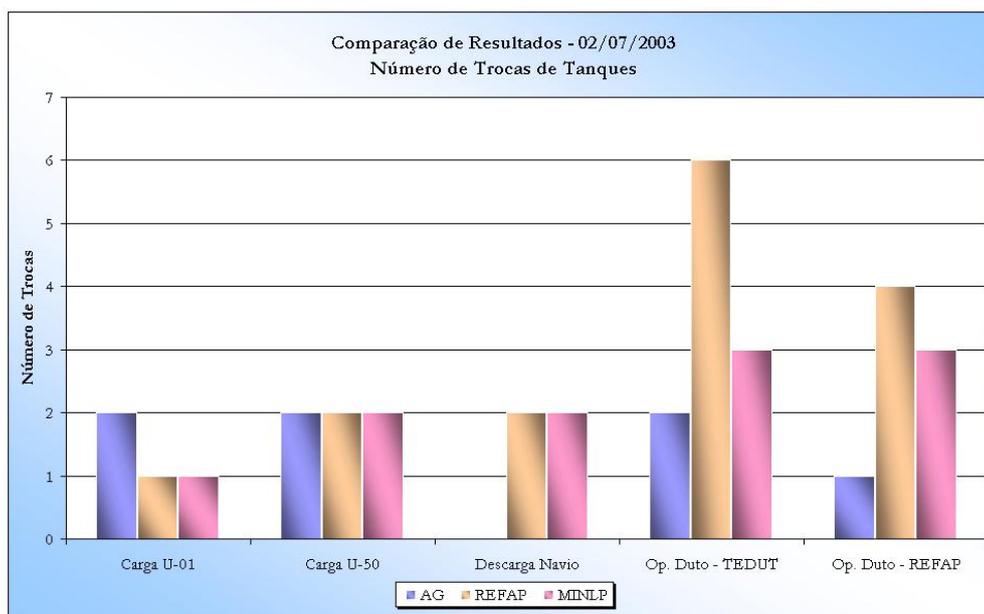


FIGURA 6.34: Comparação Número de Trocas de Tanques - 02/07/2003

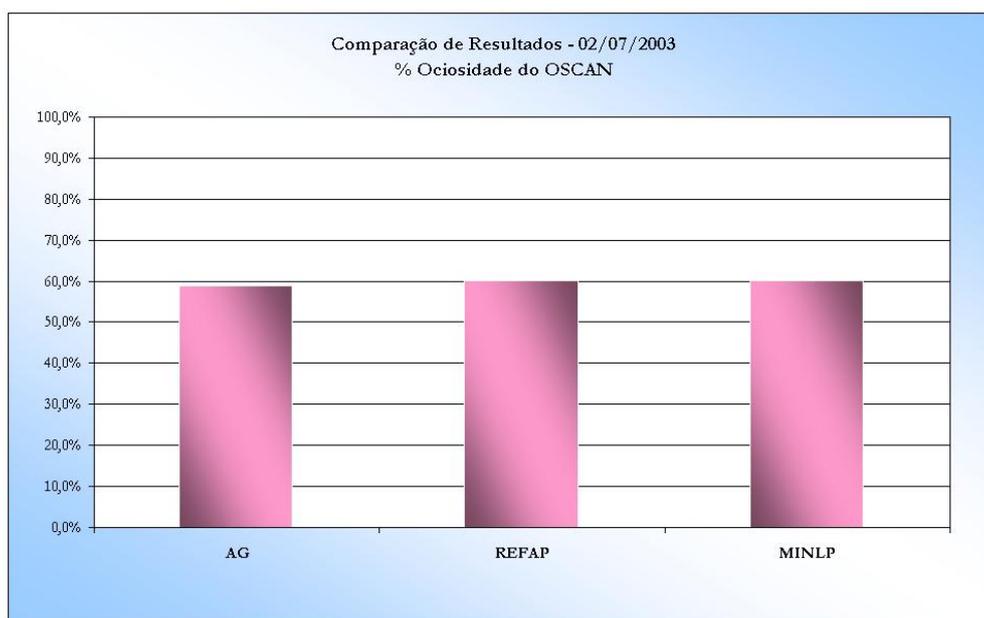


FIGURA 6.35: Comparação Ociosidade do OSCAN - 02/07/2003

Conforme mencionado, o gráfico 6.36 tem como objetivo mostrar o perfil dos níveis de estoque ao final do horizonte de programação para as soluções comparadas. Os valores representam o percentual de volume em tanque no terminal e na refinaria, ou seja, a relação entre o volume armazenado (TEDUT ou REFAP) e o volume total (TEDUT e REFAP).

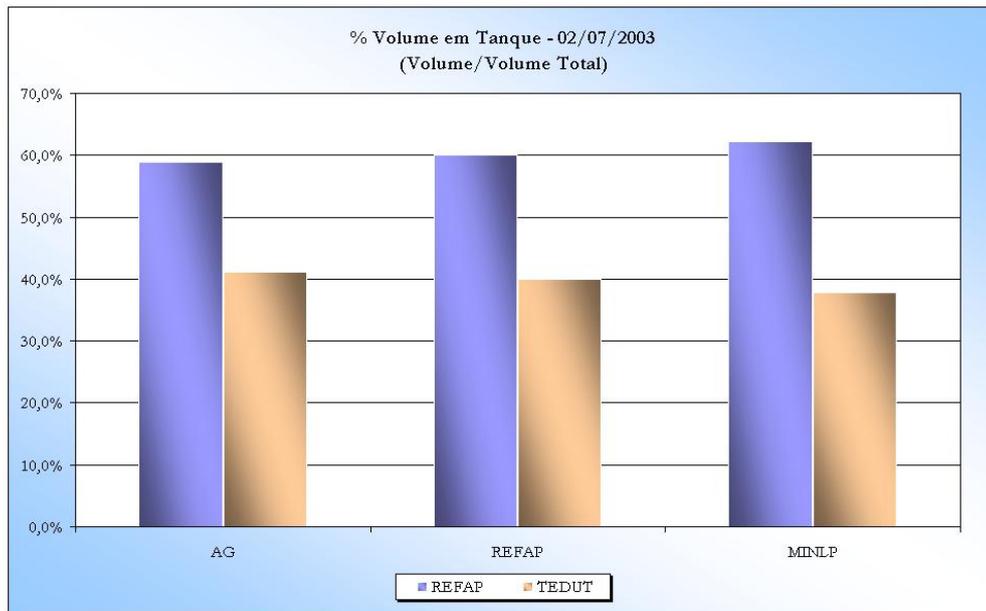


FIGURA 6.36: Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 02/07/2003

Verifica-se, mais uma vez, a aderência da solução do modelo de AG às soluções conhecidas.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo deste trabalho foi mostrar a aplicabilidade de um modelo baseado em algoritmos genéticos para auxiliar na solução do problema de programação de produção da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), com especial atenção para o *scheduling* de petróleos. O problema real abordado envolve as seguintes operações:

- recebimento de petróleo no terminal (TEDUT);
- transferência do petróleo entre terminal e refinaria (operação de oleoduto);
- recebimento do petróleo na área de estocagem de cru da refinaria;
- determinação dos tanques de carga das unidades de destilação.

O modelo considerou uma série de regras operacionais, tais como:

- operação de linhas submarinas;
- propriedades de misturas de petróleos;
- operação de oleoduto;
- tempo mínimo de carga para as unidades de destilação;
- limitações de composição de petróleos nas unidades;
- campanhas de unidades baseadas em qualidade de carga.

Utilizou-se a representação baseada em ordem, onde o cromossomo possui três segmentos: um para determinar a seqüência de tarefas programadas e os outros dois (atrelados ao primeiro) para indicar a ordem dos recursos que serão usados pela tarefa.

A decodificação da solução é feita através da leitura seqüencial dos genes do cromossomo, respeitando as regras operacionais consideradas no modelo.

A função de avaliação considerou os objetivos de minimização de:

- penalização do volume de carga planejado para as unidades de destilação (por diferença de qualidade);
- tempo de sobreestadia de navios;
- número de trocas de tanques;
- tempo ocioso de oleoduto.

Para agregação dos objetivos utilizou-se a técnica de distância do valor ao alvo, normalizando-se todas as parcelas da função de avaliação entre 0 e 1. Foram adotados pesos para cada uma das parcelas, com base em (MAGALHÃES 2004).

Como saída do modelo tem-se a seqüência de tarefas programadas, os recursos utilizados em cada operação, o resultado da função de avaliação e de suas parcelas individualmente.

A seguir listam-se algumas vantagens da solução proposta quando comparada a abordagens anteriores para o mesmo problema.

- **Flexibilidade na utilização de tanques:** a não utilização do conceito de “serviço de tanque” permite maior flexibilidade na escolha deste recurso para o recebimento de petróleo.
- **Tratamento de propriedades de petróleo:** propriedades como a densidade e o teor de enxofre, consideradas neste modelo, podem ser restritivas para a carga de uma unidade de destilação.
- **Representação contínua do tempo:** a discretização dos *volumes* de petróleo para cada tarefa permite a programação das mesmas de forma contínua.

- **Desempenho:** o tempo computacional gasto na solução das instâncias foi de aproximadamente 30 minutos, para a configuração descrita no capítulo 6.

Através dos experimentos computacionais realizados, verifica-se a consistência das respostas apresentadas pelo modelo frente às modificações nos pesos da função de avaliação durante os testes de robustez. Todas as instâncias analisadas correspondem a programações reais da refinaria e apresentaram resultados satisfatórios para uma ferramenta de apoio à atividade de programação da produção.

Os resultados de número de trocas de tanques, paradas de operação do duto e estoque final de petróleo foram comparados com soluções viáveis conhecidas. Apenas para o número de trocas de tanques de carga, nas instâncias 02/06/03 e 02/07/03, o modelo de AG apresentou soluções piores que as conhecidas. Isto demonstra resultado satisfatório da aplicação de algoritmos genéticos para as instâncias testadas e cumpre o objetivo proposto neste trabalho.

7.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Algumas possíveis extensões deste trabalho são sugeridas a seguir:

- a implementação de rotinas de pós-processamento para melhoria das soluções;
- a avaliação de outras técnicas de agregação de objetivos;
- o estudo de outras meta-heurísticas para a solução do problema;
- o estudo da inclusão de parâmetros econômicos às parcelas da função de avaliação;
- a inclusão do cálculo de outras propriedades da carga, além da densidade e do teor de enxofre;
- a inclusão de curvas de rendimento de destilação e restrições de carga também em função de propriedades de produtos;
- a desagregação da parcela de número de trocas de tanques na função de avaliação, por tipo de atividade (carga nas unidades, recebimento, envio, etc);
- a consideração de paradas programadas de unidades e de duto;

- a extensão das regras de operação do duto, considerando por exemplo vazões variáveis em função do óleo bombeado e de horários de pico de consumo.

Referências Bibliográficas

- AIRES, M. A. C. (2005), *Otimização Aplicada à Programação de Gasolina em Refinaria*, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ALMEIDA, M. R. (2001), *Programação Automática da Produção em Refinarias de Petróleo utilizando Algoritmos Genéticos*, Dissertação de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BÄCK, T., FOGEL, D. B. & MICHALEWICZ, Z. (1997), *Handbook of Evolutionary Computation*, 1 edn, Oxford University Press, Philadelphia, USA.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. & MACCHIETTO, S. (1994), ‘Detailed Design of Multipurpose Batch Plants’, *Computers & Chemical Engineering* v. **18**, n. **11/12**(Nov/Dec), pp. 1013–1042.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P. F. D. & PANTELIDES, C. C. (1997), ‘Design of Multipurpose Plants using the Resource-Task Network Unified Framework’, *Computers & Chemical Engineering* v. **21**, s.1(May), pp. S703–S708.
- BODINGTON, C. E. (1995), *Planning, Scheduling and Control Integration in the Process Industries*, 1 edn, Mc Graw-Hill, New York, NY, USA.
- CASTRO, H. P. (2001), *Utilização de Algoritmos Genéticos para Solução do Problema de Programação de Produção de uma Refinaria de Petróleo*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- CHENG, R., GEN, M. & TSUJIMURA, Y. (1996), ‘A Tutorial Survey of Job-Shop Scheduling Problems using Genetic Algorithms - I.Representation’, *Computers & Industrial Engineering* v. **30**, n. **4**(Sep), pp. 983–997.
- CRUZ, A. V. A. (2003), *Otimização do Planejamento com Restrições de Precedência usando Algoritmos Genéticos e Co-Evolução Cooperativa*, Dissertação de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CUTTING, G. A. G. & HAVERLY, C. A. (1995), ‘A System for Optimizing the Scheduling and Blending of Crudes’, *NPRA Computer Conference* .
- DOYLE, F. J., PEKNY, J. F., REKLAITIS, G. V. & VENKATASUBRAMANIAN, V. (1997), ‘A Graduate Course in Computer Process Operations’, *Computers & Chemical Engineering* v. **21**, s. **1**(May), S255–S259.
- GEN, M. & CHENG, R. (1996), *Genetic Algorithms & Engineering Design*, 1 edn, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

- JOLY, M. (1999), *Técnicas de Otimização Mista-Inteira para o Scheduling e Gerenciamento de Produção em Refinarias de Petróleo*, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- KONDILI, E., PANTELIDES, C. C. & SARGENT, R. W. H. (1993), ‘A General Algorithm for Short-Term Scheduling of Batch Operations - I.MILP Formulation’, *Computers & Chemical Engineering* **v. 17, n. 2**(Feb), pp. 211–227.
- KONG, M. T. (2002), *Downstream Oil Products Supply Chain Optimization*, Ph.D. thesis, University of London, London, UK.
- LEE, H. C. & DAGLI, C. H. (1997), ‘A Parallel Genetic-Neuro Scheduler for Job Shop Scheduling Problems’, *International Journal of Production Economics* **v.51, n. 1**(Aug), pp. 115–122.
- LEE, H., PINTO, J. M., GROSSMANN, I. E. & PARK, S. (1996), ‘Mixed-Integer Programming Model for Refinery Short-Term Scheduling of Crude Oil Unloading with Inventory Management’, *Industrial and Engineering Chemistry Research* **v. 35, n. 5**(May), pp. 1630–1641.
- MAGALHÃES, M. V. O. (2004), *Refinery Scheduling*, Ph.D. thesis, Imperial College London, London, UK.
- MÁS, R. & PINTO, J. M. (2003), ‘A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes’, *Optimization and Engineering* **v. 4, n. 1/2**(Jun), pp. 23–64.
- MAZZUCCO JÚNIOR, J. (1999), *Uma Abordagem Híbrida do Problema de Programação da Produção através dos Algoritmos Simulated Annealing e Genético*, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.
- MÉNDEZ, C. A., CERDÁ, J., GROSSMANN, I. E., HARJUNKOSKI, I. & FAHL, M. (2006), ‘State-of-the-art of Optimization Methods for Short-Term Scheduling of Batch Processes’, *Computers & Chemical Engineering* **v. 30, n. 6/7**(May), pp. 913–946.
- MICHALEWICZ, Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 1 edn, Springer-Verlag, New York, NY, USA.
- MORO, L. F. L. (2000), *Técnicas de Otimização Mista Inteira para o Planejamento e Programação de Produção em Refinarias de Petróleo*, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- MORO, L. F. L. & PINTO, J. M. (2004), ‘Mixed-Integer Programming Approach for Short-Term Crude Oil Scheduling’, *Industrial and Engineering Chemistry Research* **v. 43, n. 1**(Jan), 85–94.
- PACHECO, M. A. C., VELLASCO, M. M. B. R. & LOPES, C. H. (1999), ‘Descoberta de Conhecimento e Mineração de Dados’, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica.

- PANTELIDES, C. C. (1994), ‘Unified Frameworks for Optimal Process Planning and Scheduling’, *In: Proceedings of the second conference on foundations of computer aided operations*, pp. 254–274, Colorado, USA.
- PINTO, J. M. & GROSSMANN, I. E. (1998), ‘Assignment and Sequencing Models for the Scheduling of Process Systems’, *Ann. of Operational Research* **81**, 443–466.
- PINTO, J. M., JOLY, M. & MORO, L. F. L. (2000), ‘Planning and Scheduling Models for Refinery Operations’, *Computers & Chemical Engineering* **v. 24**, **n. 9/10**(Oct), pp. 2259–2276.
- SHAH, N. (1996), ‘Mathematical Programming Techniques for Crude Oil Scheduling’, *Computers & Chemical Engineering* **v. 20**, **n. 10**(Oct), 1227–1232.
- SIMÃO, L. M. (2004), *Otimização da Programação da Produção em Refinarias de Petróleo utilizando Algoritmos Genéticos e Co-evolução Cooperativa*, Dissertação de M.Sc., PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SIMCHI-LEVI, D., KAMINSKY, P. & SIMCHI-LEVI, E. (2003), *Cadeia de Suprimentos: Projeto e Gestão*, 1 edn, Bookman, Porto Alegre, RS, Brasil.
- VALLEUR, M. & GRUE, J. L. (2004), ‘Optimize Short-Term Refinery Scheduling’, *Hydrocarbon Processing* (Jun), pp. 46–49.

Apêndice A

Dados de Entrada

Neste apêndice são listadas todas as informações utilizadas como dados de entrada para o modelo, em todas as instâncias analisadas.

A.1 28/05/2003

TABELA A.1: Informação Inicial de Tanques - 28/05/2003

TANQUE	ESTOQUE INICIAL (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					°API	% S
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL		
TQ601	0							
TQ602	17.200			85,6	14,4		24,0	0,642
TQ611	0							
TQ612	0							
TQ613	9.500		7,9	88,9	3,2		22,0	0,671
TQ615	0							
TQ01N	53.000				2,6	97,4	35,6	0,079
TQ01O	0							
TQ01S	61.800		58,9	38,6	2,5		29,2	0,370
TQ01T	3.500		57,5	35,1	7,4		30,4	0,345
TQ01U	32.500	51,2		16,0	32,8		33,5	0,363
TQ01X	16.600		34,2	57,9	7,9		27,1	0,481

TABELA A.2: Informação Inicial de Duto - 28/05/2003

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					ORIGEM
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL	
1	23.000		7,9	88,9	3,2		TQ613

TABELA A.3: Informação de Descarregamento de Navio - 28/05/2003

NAVIO	PETRÓLEO	INÍCIO (h)	VOLUME (m ³)
1	PENL	35	63.500
2	PENL	59	40.000
3	PENL	138	151.000

TABELA A.4: Informação de Linha Submarina - 28/05/2003

LINHA	PETRÓLEO
Norte	BONL
Sul	PENL

TABELA A.5: Informação de Planejamento de UDA - 28/05/2003

UDA	CAMPANHA			INÍCIO (h)	FIM (h)	VAZÃO PLANEJADA (m ³ /dia)
		°API	% S			
U-01	ASF	28,3	0,44	0	51	10.000
U-01	BTE	34,5	0,14	51	184	6.000
U-50	BTE	34,5	0,14	0	144	10.000
U-50	RAT	34,9	0,08	144	192	10.000

A.2 02/06/2003

TABELA A.6: Informação Inicial de Tanques - 02/06/2003

TANQUE	ESTOQUE INICIAL (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					°API	% S
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL		
TQ601	7.000		17,0	83,0			32,0	0,242
TQ602	17.200			85,6	14,4		24,0	0,642
TQ611	0							
TQ612	27.100					100	34,9	0,08
TQ613	3.400		7,9	88,9	3,2		22,0	0,671
TQ615	0							
TQ01N	42.600				2,6	97,4	35,3	0,079
TQ01O	0							
TQ01S	13.000		58,9	38,6	2,5		29,2	0,370
TQ01T	38.000		46,5	50,2	3,3		27,6	0,439
TQ01U	12.500	51,2		16,0	32,8		33,5	0,363
TQ01X	13.600		29,0	64,0	7,0		26,1	0,518

TABELA A.7: Informação Inicial de Duto - 02/06/2003

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					ORIGEM
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL	
1	2.000					100	TQ612
2	19.000					100	TQ611
3	2.000					100	TQ612

TABELA A.8: Informação de Descarregamento de Navio - 02/06/2003

NAVIO	PETRÓLEO	INÍCIO (h)	VOLUME (m ³)
1	PENL	0	101.000
2	BONL	36	110.000

TABELA A.9: Informação de Linha Submarina - 02/06/2003

LINHA	PETRÓLEO
Norte	PENL
Sul	PENL

TABELA A.10: Informação de Planejamento de UDA - 02/06/2003

UDA	CAMPANHA		INÍCIO (h)	FIM (h)	VAZÃO PLANEJADA (m ³ /dia)	
		°API				% S
U-01	BTE	34,5	0,14	0	199	6.000
U-50	BTE	34,5	0,14	0	31	10.000
U-50	RAT	34,9	0,08	31	103	10.000
U-50	BTE	34,5	0,14	103	183	10.000

A.3 09/06/2003

TABELA A.11: Informação Inicial de Tanques - 09/06/2003

TANQUE	ESTOQUE INICIAL (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					°API	% S
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL		
TQ601	34.800		4,3	95,7			20,5	0,714
TQ602	17.200			85,6	14,4		24,0	0,642
TQ611	49.500					100	34,9	0,08
TQ612	30.500					100	34,9	0,08
TQ613	40.800		16,7	83,3			22,3	0,640
TQ615	21.400		70,8	26,2	3,0		31,1	0,295
TQ01N	0							
TQ01O	35.600					100	34,9	0,08
TQ01S	62.500		78,1	21,9			31,3	0,271
TQ01T	29.613		63,8	34,0	2,2		29,8	0,342
TQ01U	13.500	51,2		16,0	32,8		33,5	0,363
TQ01X	9.300		47,9	46,9	5,0		28,4	0,417

TABELA A.12: Informação Inicial de Duto - 09/06/2003

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					ORIGEM
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL	
1	6.000		70,8	26,2	3,0		TQ615
2	8.000					100	TQ611
3	9.000					100	TQ612

TABELA A.13: Informação de Descarregamento de Navio - 09/06/2003

NAVIO	PETRÓLEO	INÍCIO (h)	VOLUME (m ³)
1	PENL	12	70.000

TABELA A.14: Informação de Linha Submarina - 09/06/2003

LINHA	PETRÓLEO
Norte	BONL
Sul	BONL

TABELA A.15: Informação de Planejamento de UDA - 09/06/2003

UDA	CAMPANHA		INÍCIO (h)	FIM (h)	VAZÃO PLANEJADA (m ³ /dia)	
		°API				% S
U-01	BTE	34,5	0,14	0	279	6.000
U-50	BTE	34,5	0,14	0	48	11.500
U-50	RAT	34,9	0,08	48	120	11.500
U-50	BTE	34,5	0,14	120	220	11.500

A.4 16/06/2003

TABELA A.16: Informação Inicial de Tanques - 16/06/2003

TANQUE	ESTOQUE INICIAL (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					°API	% S
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL		
TQ601	7.500		4,3	95,7			20,5	0,714
TQ602	19.100			85,6	14,4		24,0	0,642
TQ611	33.000					100	34,9	0,08
TQ612	10.500					100	34,9	0,08
TQ613	26.800		16,7	83,3			22,3	0,640
TQ615	0							
TQ01N	0							
TQ01O	13.700					100	34,9	0,08
TQ01S	1.500		78,1	21,9			31,3	0,271
TQ01T	58.000		49,3	50,7			27,1	0,444
TQ01U	12.500	51,2		16,0	32,8		33,5	0,363
TQ01X	29.300		80,5	17,4	2,1		32,3	0,243

TABELA A.17: Informação Inicial de Duto - 16/06/2003

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					ORIGEM
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL	
1	23.000		20,0	80,0			TQ615

TABELA A.18: Informação de Planejamento de UDA - 16/06/2003

UDA	CAMPANHA		INÍCIO (h)	FIM (h)	VAZÃO PLANEJADA (m ³ /dia)	
		°API				% S
U-01	BTE	34,5	0,14	0	288	6.000
U-50	BTE	34,5	0,14	0	71	10.000
U-50	RAT	34,9	0,08	71	157	10.000
U-50	BTE	34,5	0,14	157	306	10.000

A.5 02/07/2003

TABELA A.19: Informação Inicial de Tanques - 02/07/2003

TANQUE	ESTOQUE INICIAL (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					°API	% S
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL		
TQ601	22.000		82,7	17,3			32,0	0,244
TQ602	21.000	22,0		74,6	3,4		22,7	0,651
TQ611	35.000					100	34,9	0,08
TQ612	63.000					100,0	34,9	0,08
TQ613	0							
TQ615	22.000		71,2	28,8			30,3	0,313
TQ01N	7.500					100,0	34,9	0,08
TQ01O	14.100					100,0	34,9	0,08
TQ01S	56.000		67,2	32,8			29,7	0,337
TQ01T	2.100		52,7	47,3			27,6	0,424
TQ01U	13.500	51,2		16,0	32,8		33,5	0,363
TQ01X	15.500		37,9	62,1			25,4	0,513

TABELA A.20: Informação Inicial de Duto - 02/07/2003

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	COMPOSIÇÃO (%)					ORIGEM
		AB31	BONL	MR33	NKOS	PENL	
1	2.000		68,6	31,4			TQ613
2	20.000					100,0	TQ611
3	1.000					100,0	TQ612

TABELA A.21: Informação de Descarregamento de Navio - 02/07/2003

NAVIO	PETRÓLEO	INÍCIO (h)	VOLUME (m ³)
1	PENL	17	40.000

TABELA A.22: Informação de Linha Submarina - 02/07/2003

LINHA	PETRÓLEO
Norte	PENL
Sul	PENL

TABELA A.23: Informação de Planejamento de UDA - 02/07/2003

UDA	CAMPANHA		INÍCIO (h)	FIM (h)	VAZÃO PLANEJADA (m ³ /dia)
		°API % S			
U-01	BTE	34,5 0,14	0	329	6.000
U-50	RAT	34,9 0,08	0	39	9.000
U-50	BTE	34,5 0,14	39	99	10.000
U-50	BTE	34,5 0,14	99	168	10.000

Apêndice B

Biblioteca GACOM

O GACOM é uma biblioteca, desenvolvida pelo Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada da Puc-Rio (www.ica.ele.puc-rio.br), que tem a finalidade de permitir o desenvolvimento de programas utilizando técnicas de computação evolucionária.

A biblioteca possui as seguintes características:

- formada por componentes modulares;
- possui diversos tipos de representação
 - binária;
 - real;
 - inteira;
 - ordem;
- possui capacidade para implementação de cromossomos segmentados;
- 3 componentes de inicialização de população;
- componentes de parada, saída, normalização e elitismo (*steady-state*);
- componentes de seleção de genitores e operadores (roleta);
- diversos operadores genéticos de *crossover* e mutação
 - binário;
 - inteiro;

- ordem;
- real;
- multiobjetivos.

A seguir são listados os principais módulos do GACOM.

- **Estruturas principais do algoritmo genético:** amostradores, condição de parada, saída, população.
- **Interfaces:** possibilitam a reusabilidade.
- **Evolução:** operadores e reprodução, seleção de genitores (roleta), técnicas de elitismo (*steady-state*).
- **Avaliação:** decodifica e avalia a solução.

Apêndice C

Resultados Adicionais

C.1 Soluções das Instâncias

C.1.1 09/06/2003

O gráfico de Gantt para este cenário de programação é mostrado na figura C.1, a fim de apresentar a seqüência e a duração das tarefas, bem como a utilização dos recursos.

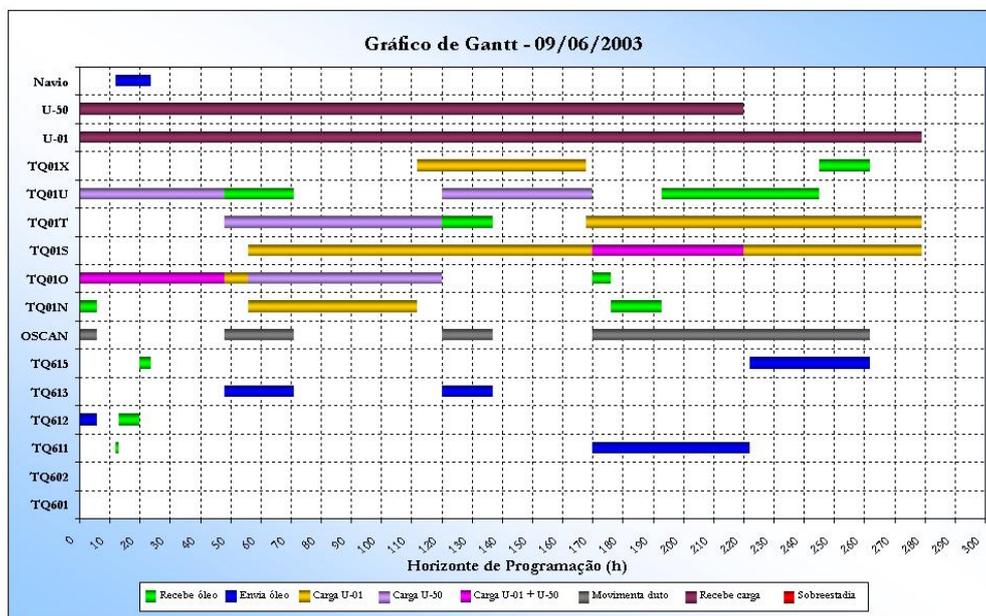


FIGURA C.1: Gráfico de Gantt - 09/06/03

Através do gráfico de Gantt para esta instância pode-se observar que:

- todo o volume a ser descarregado foi realizado sem sobreestadia;
- o descarregamento do volume do navio é feito para três tanques (TQ611, TQ612 e TQ615);
- os recursos TQ601 e TQ602 não foram programados para todo o horizonte;
- a carga das unidades de destilação foi distribuída entre todos os tanques da refinaria, sendo que os tanques TQ01O e TQ01S foram os mais utilizados;
- o tanque TQ01S foi o único que não recebeu volume movimentado através do OSCAN;
- as paradas de duto ocorreram em três momentos, durante um horizonte de 10 dias;
- os tanques TQ01O e TQ01S foram programados para alimentar as duas unidades, simultaneamente, nos intervalos 0h - 48h e 170h - 220h;
- as unidades U-01 e U-50 operam ininterruptamente durante todo o horizonte planejado.

A tabela C.1 mostra, para cada uma das UDAs, os resultados de atendimento ao volume de carga e o número de trocas de tanques referentes à tarefa de carga das unidades de destilação.

TABELA C.1: Resultados de Atendimento à Demanda - 09/06/03

UNIDADE	NUM. TROCAS TQS DE CARGA	VOLUME PLANEJADO (m³)	VOLUME PENALIZADO (m³)
U-01	3	69.750	14.721
U-50	3	105.417	18.323

Verifica-se para esta instância uma penalização de 33.044m³ no volume de carga processada, devido à diferença de qualidade da carga.

As tabelas C.2 e C.3 mostram as informações detalhadas sobre os volumes planejados e programados para cada uma das unidades de destilação.

TABELA C.2: Informações de programação de carga da U-01 - 09/06/03

PERÍODO		0 - 56	56 - 112	112 - 168	168 - 224	224 - 279
U-01	PRINC	TQ01O	TQ01S	TQ01X	TQ01S	TQ01S
	VAZÃO	5.693	2.905	2.745	3.420	3.420
	AUX	-	TQ01N	TQ01S	TQ01T	TQ01T
	VAZÃO	-	2.124	1.707	823	823
	PLAN	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
	PENAL	307	971	1.548	2.580	2.580
	API	34,900	31,221	29,358	28,368	28,368
	%S	0,080	0,282	0,368	0,392	0,392
	CND	0,000	0,013	0,035	0,000	0,000
	MRL	0,000	0,238	0,385	0,420	0,420

TABELA C.3: Informações de programação de carga da U-50 - 09/06/03

PERÍODO		0 - 48	48 - 120	120 - 170	170 - 220
U-50	PRINC	TQ01U	TQ01T	TQ01U	TQ01S
	VAZÃO	5.529	7.092	6.584	9.744
	AUX	TQ01O	TQ01O	TQ01O	-
	VAZÃO	4.507	1629	3.285	-
	PLAN	11.500	11.500	11.500	11.500
	PENAL	1.464	2.779	1.631	1.756
	API	34,107	30,558	33,956	31,303
	%S	0,246	0,305	0,278	0,271
	CND	0,193	0,019	0,000	0,000
	MRL	0,094	0,292	0,000	0,219

Verifica-se, na programação da U-01, três trocas de tanques: a unidade opera com o tanque TQ01O nas primeiras 56 horas do horizonte, quando a programação é alterada para o par TQ01S e TQ01N para as próximas 56 horas. No instante 112h os tanques TQ01X e TQ01S iniciam carga na U-01 até 168h. A partir deste instante, a programação seleciona o par TQ01S e TQ01T até o fim do horizonte. Não há previsão de mudança de campanha para a U-01 durante o horizonte considerado, desta forma, pode-se atribuir as trocas de tanques à falta de volume. O planejamento da U-50 sugere uma troca de campanha às 48h e observa-se a troca de tanques no momento da mudança de campanha (TQ01U + TQ01O para TQ01T + TQ01O). Em seguida, quando a campanha RAT é finalizada e há programação para a campanha BTE, o

mesmo par inicial volta a servir como carga da unidade. A programação é finalizada com o tanque TQ01S.

TABELA C.4: Informações de movimentação de itens de cru - 09/06/03

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	TIE	TFE	TIS	TFS	PETRÓLEO	ORIGEM	DESTINO
1	6.000			0	6	MR33-26,3% NKOS-3,0% BONL-70,8%	OSCAN	TQ01N
2	17.000			48	65	PENL-100%	OSCAN	TQ01U
3	6.000	0	6	65	71	PENL-100%	TQ612	TQ01U
4	17.000	48	65	120	137	MR33-83,3% BONL-16,7%	TQ613	TQ01T
5	6.000	65	71	170	176	MR33-83,3% BONL-16,7%	TQ613	TQ01O
6	17.000	120	137	176	193	MR33-83,3% BONL-16,7%	TQ613	TQ01N
7	6.000	170	176	193	199	PENL-90% BONL-10%	TQ611	TQ01U
8	17.000	176	193	199	216	PENL-90% BONL-10%	TQ611	TQ01U
9	6.000	193	199	216	222	PENL-90% BONL-10%	TQ611	TQ01U
10	23.000	199	222	222	245	PENL-90% BONL-10%	TQ611	TQ01U
11	17.000	222	239	245	262	MR33-12,9% NKOS-1,5% BONL-34,8% PENL-50,9%	TQ615	TQ01X
12	6.000	239	245			MR33-12,9% NKOS-1,5% BONL-34,8% PENL-50,9%	TQ615	OSCAN
13	17.000	245	262			MR33-12,9% NKOS-1,5% BONL-34,8% PENL-50,9%	TQ615	OSCAN

A tabela C.4 apresenta informações detalhadas sobre as tarefas de movimentação de itens de cru para a instância de 09/06/2003.

Nota-se que os dois primeiros itens correspondem ao estoque inicial do duto, demonstrando o bombeamento destes itens para o OSCAN antes do início do horizonte. De maneira similar, os itens 12 e 13 foram os últimos bombeios do tanque TQ615 e ocuparam completamente o OSCAN até o final do horizonte.

Informações complementares sobre a operação do OSCAN encontram-se na tabela C.5, onde são mostrados os instantes das paradas de operação do duto, a duração de cada uma delas, o tempo total de ociosidade do duto e o percentual de utilização do mesmo.

TABELA C.5: Informação de utilização de duto - 09/06/03

UTILIZAÇÃO DE DUTO			
PARADA	INÍCIO (h)	FIM (h)	DURAÇÃO
1	6	48	42
2	71	120	49
3	137	170	33
4	262	279	17
Tempo total de ociosidade			141
% Ociosidade			49,5%
% Utilização do duto			50,5%

O descarregamento do navios foi programado sem gerar custos de sobreestadia e os volumes enviados para os tanques do TEDUT encontram-se na tabela C.6.

TABELA C.6: Informações de descarregamento de navio - 09/06/03

NAVIO	VOLUME (m ³)	TID	TFD	PETRÓLEO	LINHA	DESTINO		
						TQ612	TQ615	N + S
1	70.000	12,00	23,67	PENL	N + S	33.838	22.162	14.000

Os gráficos C.2 e C.3 apresentam os valores de volume planejado e de volume programado para a U-01 e U-50, respectivamente, com as indicações dos tanques de carga utilizados em cada período. A visualização dos dados de qualidade de carga pode ser feita através dos gráficos C.4 e C.5 para API e C.6 e C.7 para o teor de enxofre.

Os gráficos C.8 e C.9 apresentam os níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria, ao longo do horizonte de programação. Verifica-se, ao final do horizonte, o

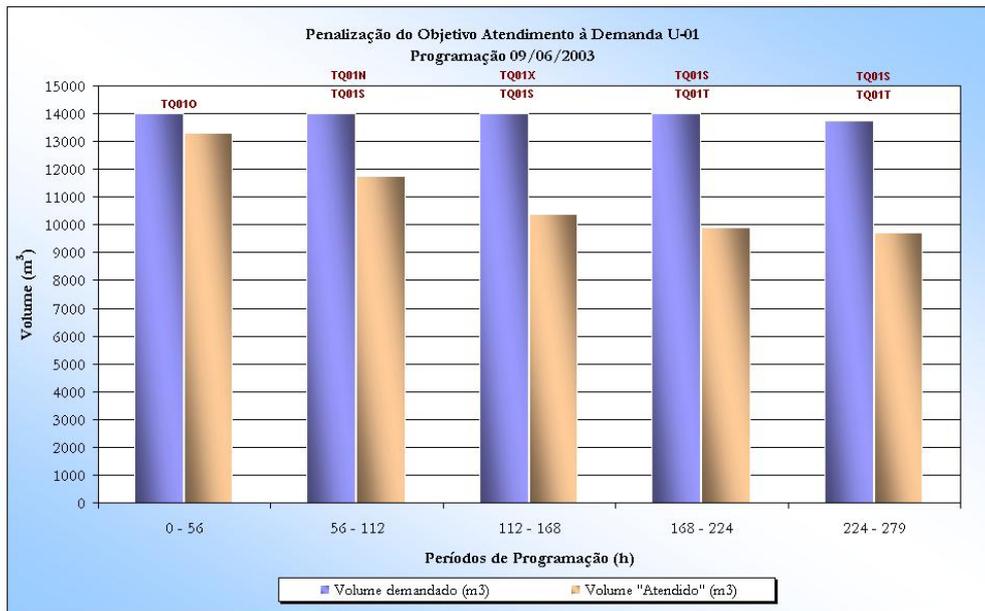


FIGURA C.2: Atendimento ao volume planejado U-01 - 09/06/03

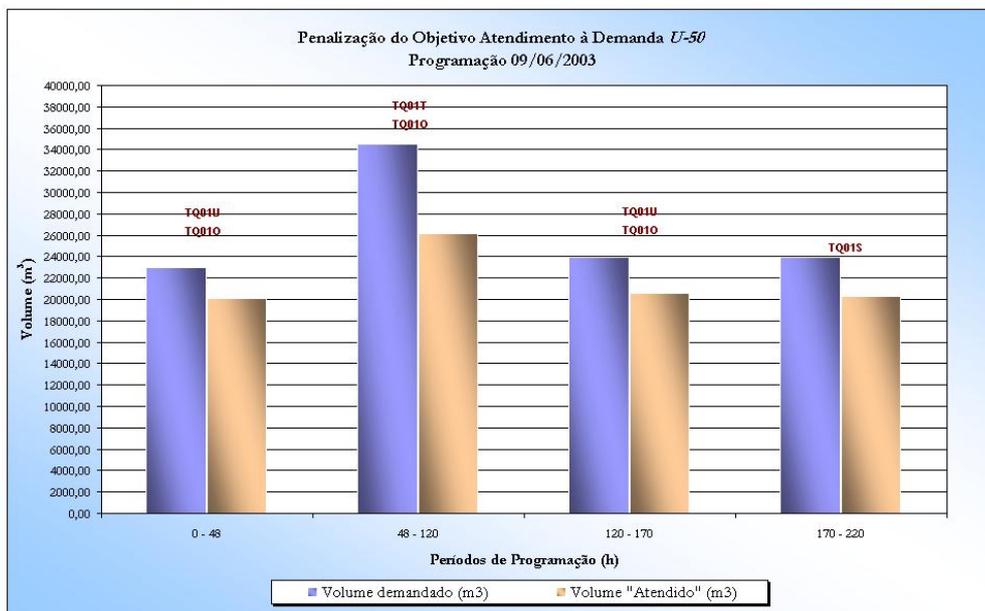


FIGURA C.3: Atendimento ao volume planejado U-50 - 09/06/03

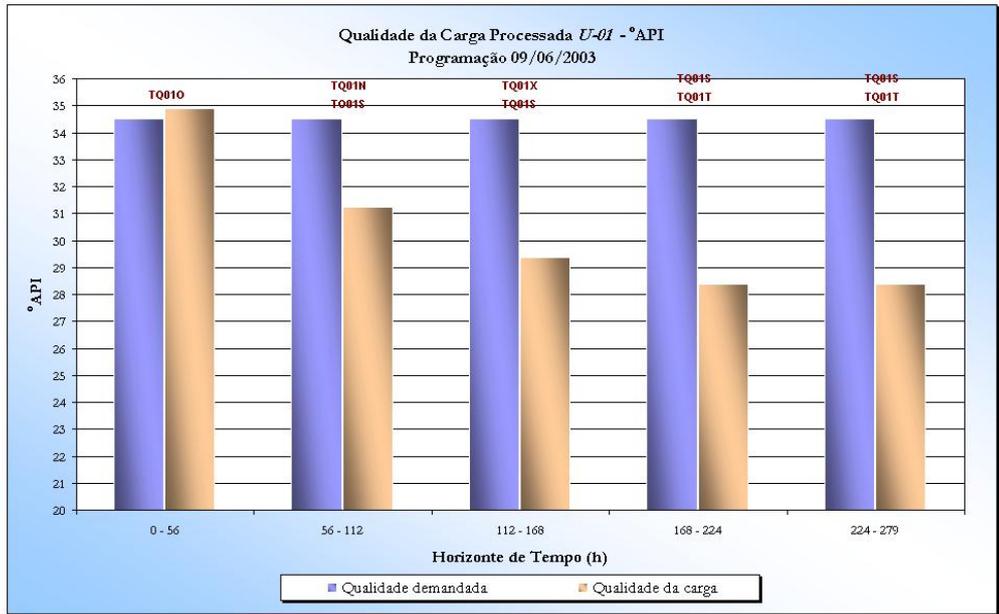


FIGURA C.4: API da carga U-01 - 09/06/03

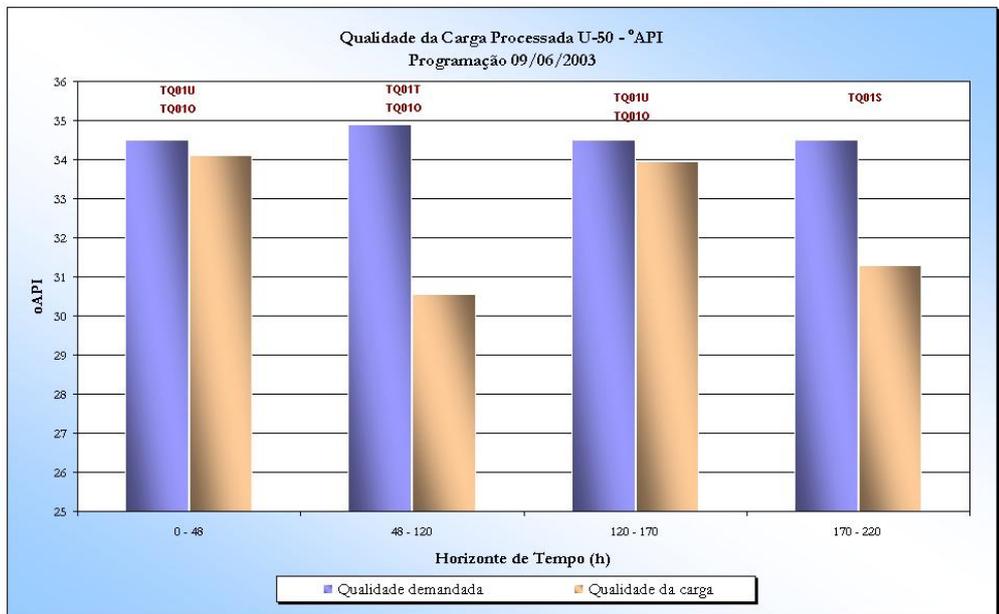


FIGURA C.5: API da carga U-50 - 09/06/03

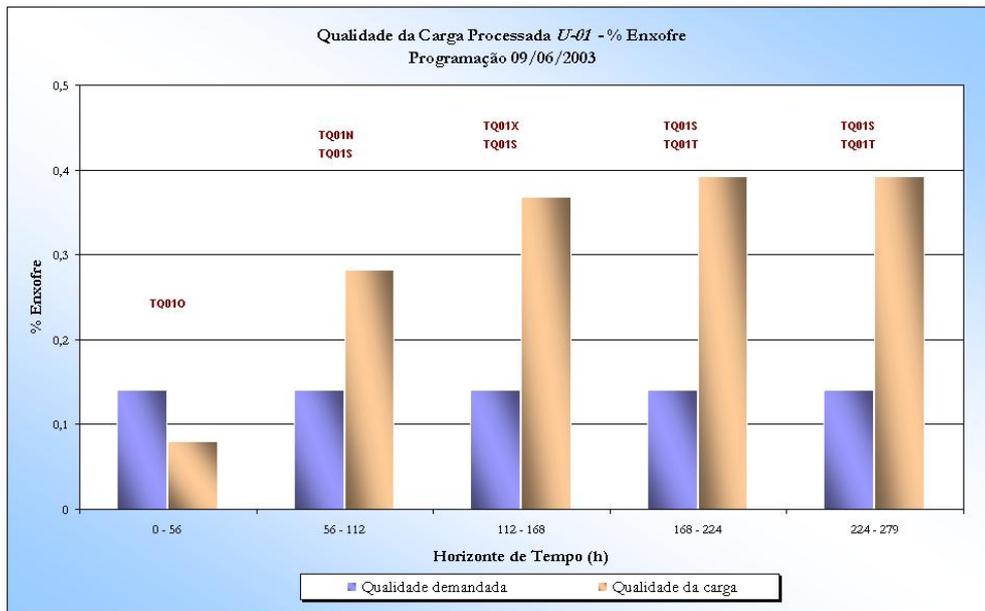


FIGURA C.6: Enxofre da carga U-01 - 09/06/03

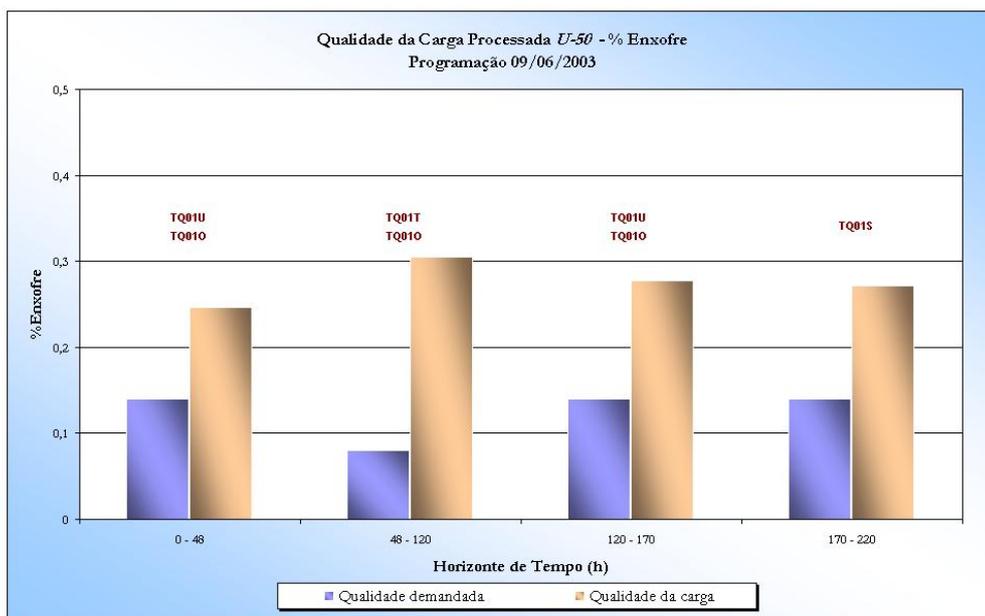


FIGURA C.7: Enxofre da carga U-50 - 09/06/03

volume total de 113.346m³ de óleo na refinaria e 126.199m³ no terminal.

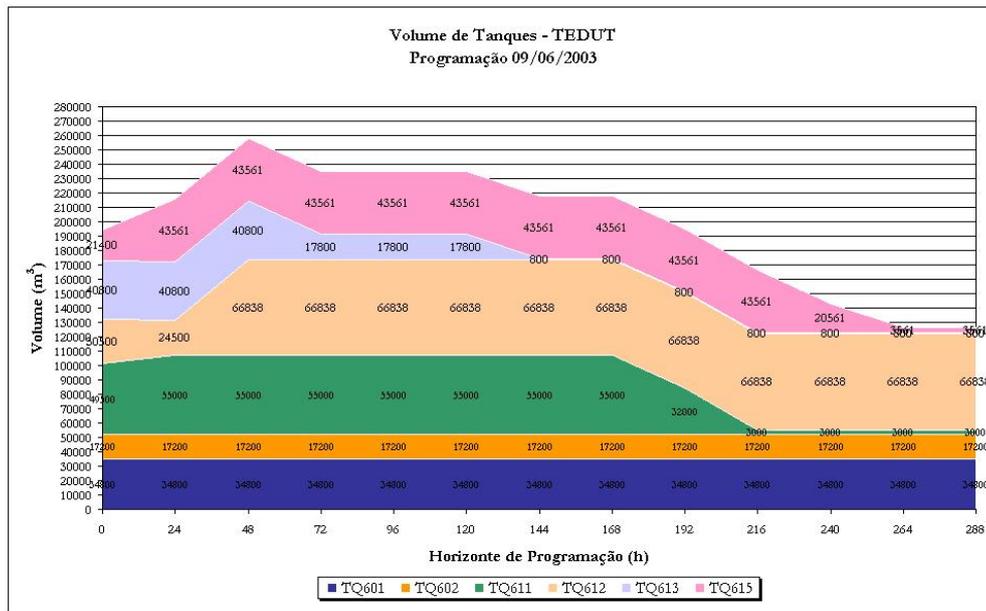


FIGURA C.8: Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 09/06/03

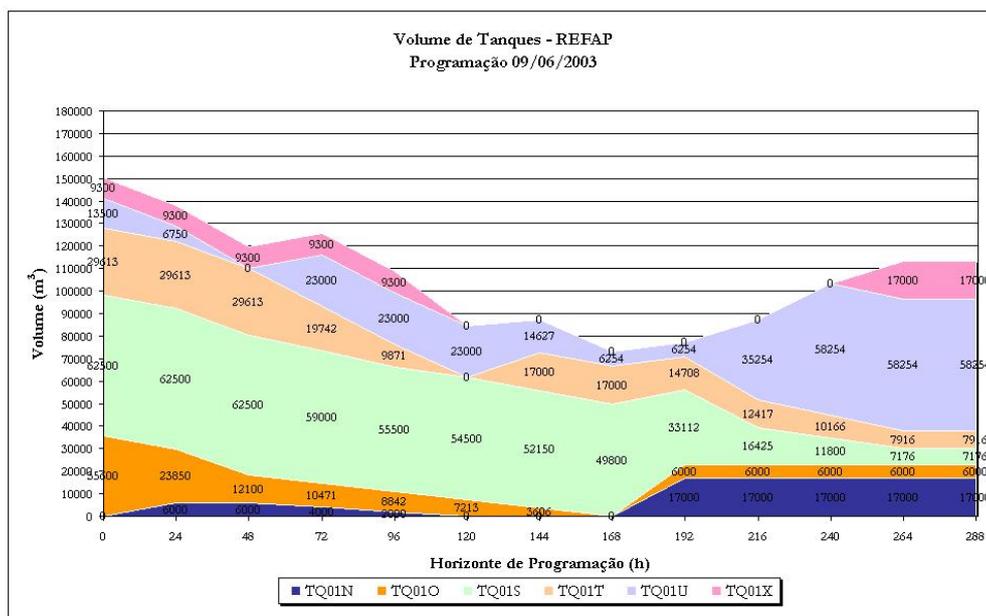


FIGURA C.9: Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 09/06/03

A tabela C.7 apresenta o número de trocas de tanques para as operações de descarregamento, de envio e recebimento de petróleo.

TABELA C.7: Número de trocas de tanques - 09/06/03

TROCA DE TANQUES		
DESCARGA DE NAVIO	2	
OPERAÇÃO DUTO	TEDUT	3
	REFAP	6

C.1.2 16/06/2003

Esta instância apresenta um cenário interessante, no qual não há previsão para descarregamento de petróleo no terminal, o oleoduto foi demandado por apenas 66,5 horas e não houve programação para 20.416m³ de carga para a unidade U-50.

O gráfico de Gantt para este cenário de programação é mostrado na figura C.10.

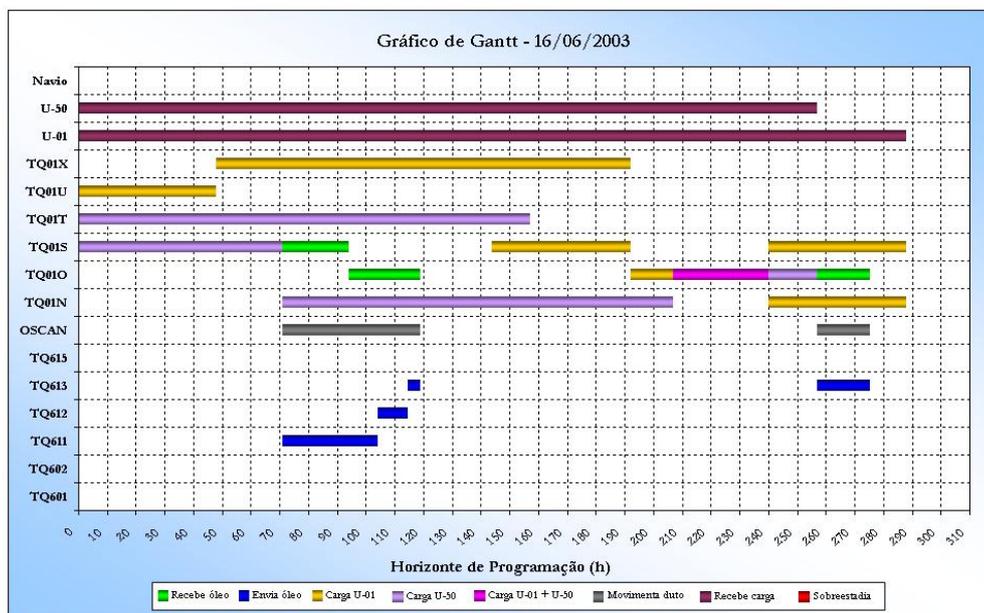


FIGURA C.10: Gráfico de Gantt - 16/06/03

As seguintes observações podem ser feitas a partir do gráfico de Gantt:

- os recursos TQ601, TQ602 e TQ615 não foram programados durante todo o horizonte;
- a carga das unidades de destilação foi distribuída entre todos os tanques da refinaria;
- o petróleo movimentado no OSCAN foi enviado para os tanques TQ010 e TQ01S;

- o tanque TQ01O foi programado como carga das duas unidades no intervalo 207h - 240h;
- as unidades U-01 e U-50 operam ininterruptamente durante todo o horizonte planejado.

A tabela C.8 mostra, para cada uma das UDAs, os resultados de atendimento ao volume de carga e número de trocas de tanques referentes à tarefa de carga das unidades de destilação.

TABELA C.8: Resultados de Atendimento à Demanda - 16/06/03

UNIDADE	NUM. TROCA TQS DE CARGA	VOLUME PLANEJADO (m3)	VOLUME PENALIZADO (m3)	VOLUME NÃO PROGRAMADO
U-01	4	72.000	9.224	-
U-50	3	127.500	23.729	20.417

Verifica-se, neste caso, a penalização de 32.952m³ no volume de carga processada, devido à diferença de qualidade da carga. Além disto, foi observado que o algoritmo programou apenas 107.083m³ de carga para a U-50, quando o volume planejado era de 127.500m³ para esta unidade.

As tabelas C.9 e C.10 mostram as informações detalhadas sobre os volumes planejados e programados para cada uma das unidades de destilação.

TABELA C.9: Informações de programação de carga da U-01 - 16/06/03

PERÍODO	0 - 48	48 - 96	96 - 144	144 - 192	192 - 240	240 - 288	
U-01	PRINC	TQ01U	TQ01X	TQ01X	TQ01S	TQ01O	TQ01N
	VAZÃO	4.914	5.310	5.310	2.634	5.693	2.704
	AUX	-	-	-	TQ01X	-	TQ01S
	VAZÃO	-	-	-	2.345	-	2.477
	PLAN	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
	PENAL	1.086	690	690	1.021	307	819
	API	33,549	32,252	32,252	26,986	34,900	28,558
	%S	0,363	0,243	0,243	0,192	0,080	0,118
	CND	0,328	0,021	0,021	0,009	0,000	0,000
	MRL	0,160	0,174	0,174	0,420	0,000	0,420

TABELA C.10: Informações de programação de carga da U-50 - 16/06/03

PERÍODO		0 - 71	71 - 157	157 - 207	207 - 257
U-50	PRINC	TQ01T	TQ01T	TQ01N	TQ01O
	VAZÃO	6.137	4.697	9.489	9.489
	AUX	TQ01S	TQ01N	-	-
	VAZÃO	430	2.110	-	-
	PLAN	10.000	10.000	10.000	10.000
	PENAL	3.434	3.193	511	511
	API	27,311	28,744	34,900	34,900
	%S	0,435	0,367	0,080	0,080
	CND	0,000	0,000	0,000	0,000
	MRL	0,400	0,400	0,000	0,000

Verifica-se, na programação da U-01, quatro trocas de tanques: a unidade opera com o tanque TQ01U nas primeiras 48 horas do horizonte, quando a programação é alterada para o tanque TQ01X, o qual permanece em carga nas 96 horas seguintes. No instante 144h os tanques TQ01S e TQ01X iniciam carga na U-01 até 192h. A partir deste instante, a programação seleciona o tanque TQ01O e em seguida o TQ01N até o fim do horizonte. O planejamento da U-50 sugere trocas de tanque nos momentos em que deve haver mudança de campanha (71h e 157h) e em seguida, na continuidade da campanha BTE no final do horizonte de programação.

Observa-se para esta instância grande número de trocas desnecessárias, que prejudicam até mesmo a qualidade da carga e comprometem o resultado da parcela de penalização de volume na função de avaliação.

A tabela C.11 apresenta informações detalhadas sobre as tarefas de movimentação de itens de cru para esta instância.

Informações complementares sobre a operação do OSCAN encontram-se na tabela C.12.

TABELA C.11: Informações de movimentação de itens de cru - 16/06/03

ITEM DE CRU	VOLUME (m ³)	TIE	TFE	TIS	TFS	PETRÓLEO	ORIGEM	DESTINO
1	23.000			71	94	BONL-20% MR33-80%	OSCAN	TQ01S
2	10.000	71	81	94	104	PENL-100%	TQ611	TQ01O
3	10.500	81	91,5	104	114,5	PENL-100%	TQ611	TQ01O
4	4.600	91,5	96,1	114,5	119,1	PENL-100%	TQ611	TQ01O
5	7.900	96,1	104	257	264,9	PENL-100%	TQ611	TQ01O
6	10.500	104	114,5	264,9	275,4	PENL-100%	TQ612	TQ01O
7	4.600	114,5	119,1			BONL-16,7% MR33-83,7%	TQ613	OSCAN
8	18.400	257	275,4			BONL-16,7% MR33-83,7%	TQ613	OSCAN

TABELA C.12: Informação de utilização de duto - 16/06/03

UTILIZAÇÃO DE DUTO			
PARADA	INÍCIO (h)	FIM (h)	DURAÇÃO
1	0	71	71
2	119,1	257	137,9
3	275,4	288	12,6
Tempo total de ociosidade			221,5
% Ociosidade			76,9%
% Utilização do duto			23,1%

Os gráficos C.11 e C.12 apresentam os valores de volume planejado e de volume programado para a U-01 e U-50, respectivamente, com as indicações dos tanques de carga utilizados em cada período. A visualização dos dados de qualidade de carga pode ser feita através dos gráficos C.13 e C.14 para API e C.15 e C.16 para o teor de enxofre.

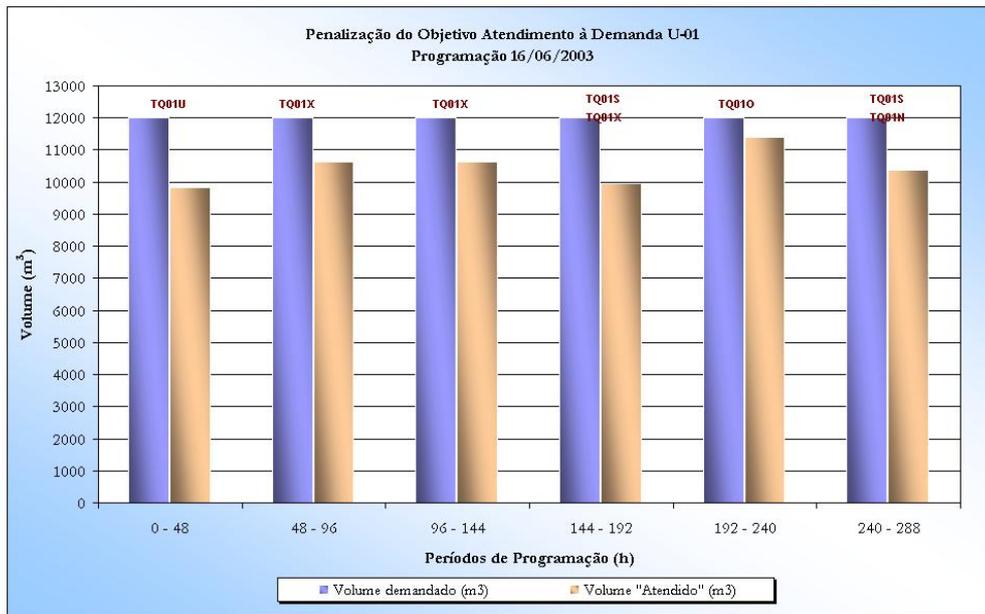


FIGURA C.11: Atendimento ao volume planejado U-01 - 16/06/03

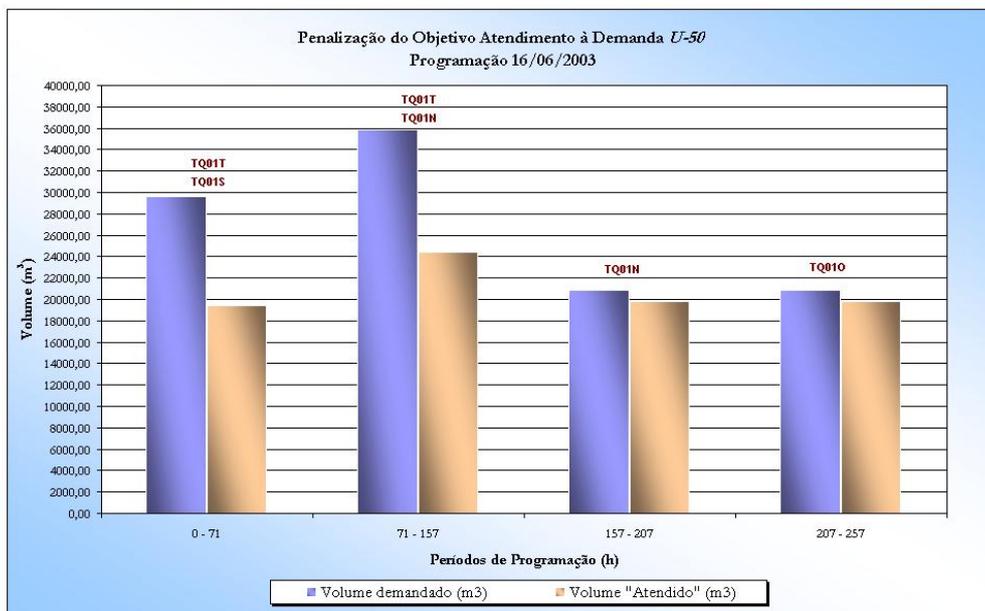


FIGURA C.12: Atendimento ao volume planejado U-50 - 16/06/03

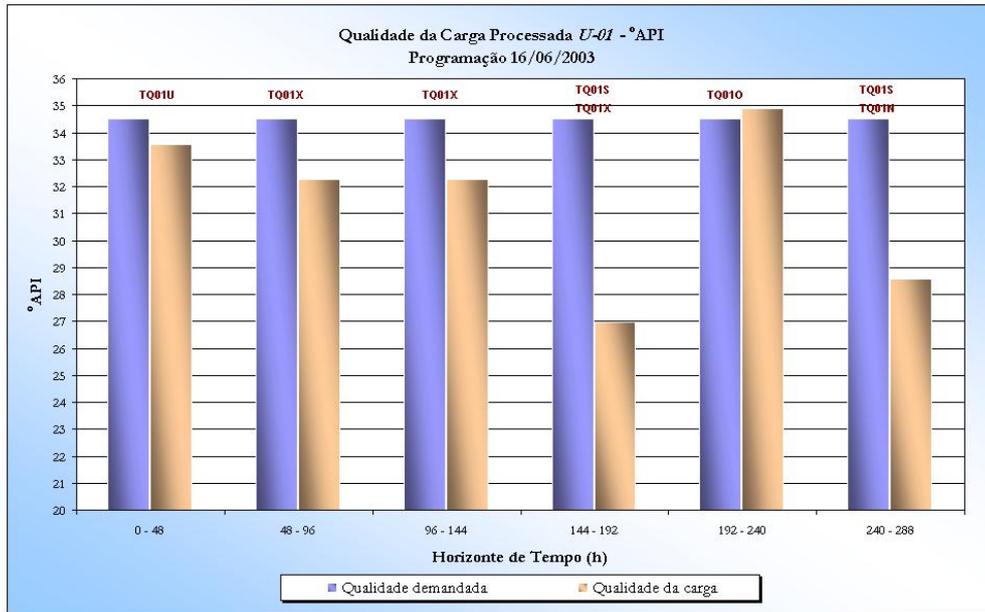


FIGURA C.13: API da carga U-01 - 16/06/03

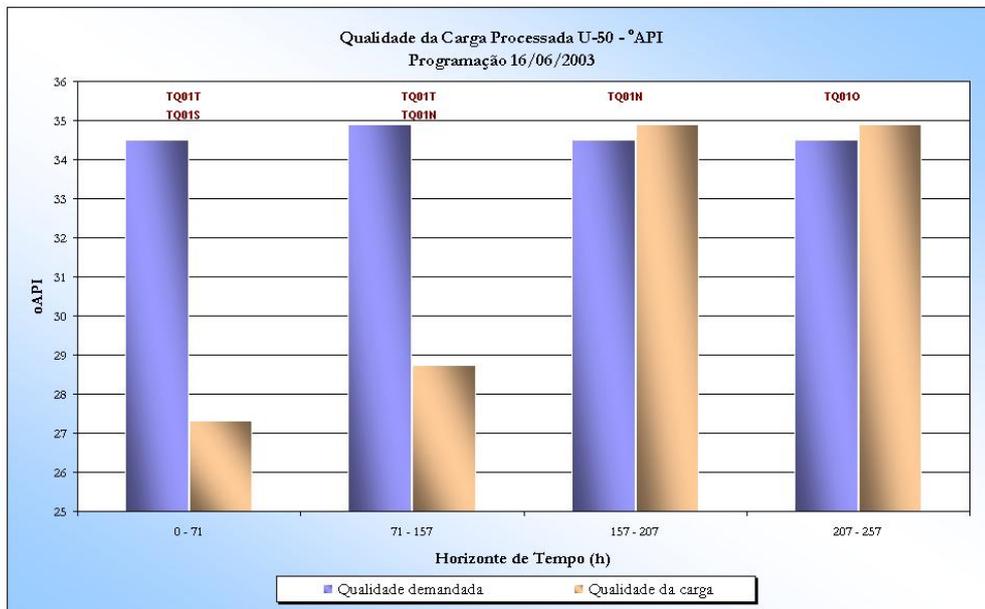


FIGURA C.14: API da carga U-50 - 16/06/03

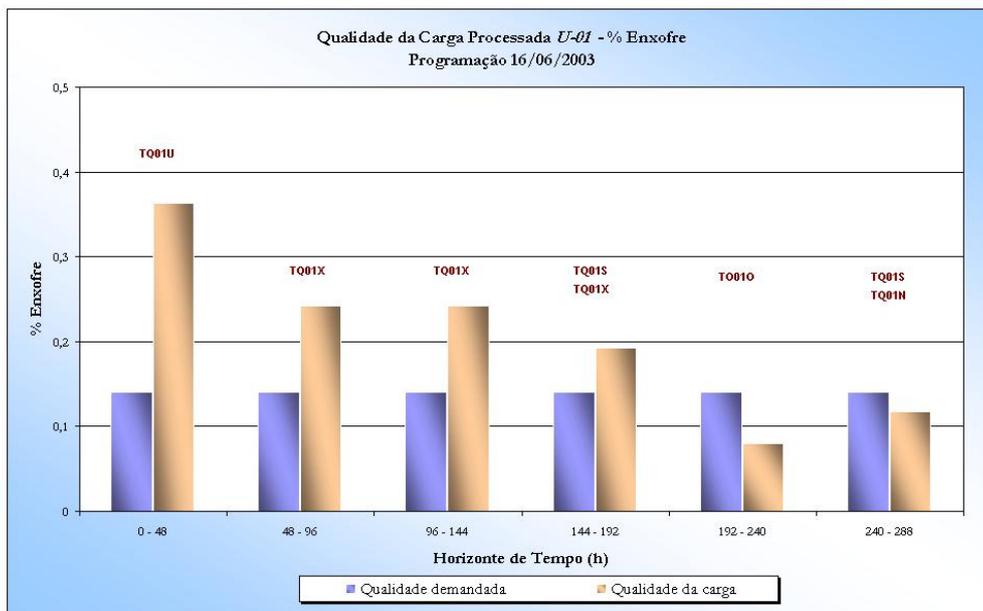


FIGURA C.15: Enxofre da carga U-01 - 16/06/03

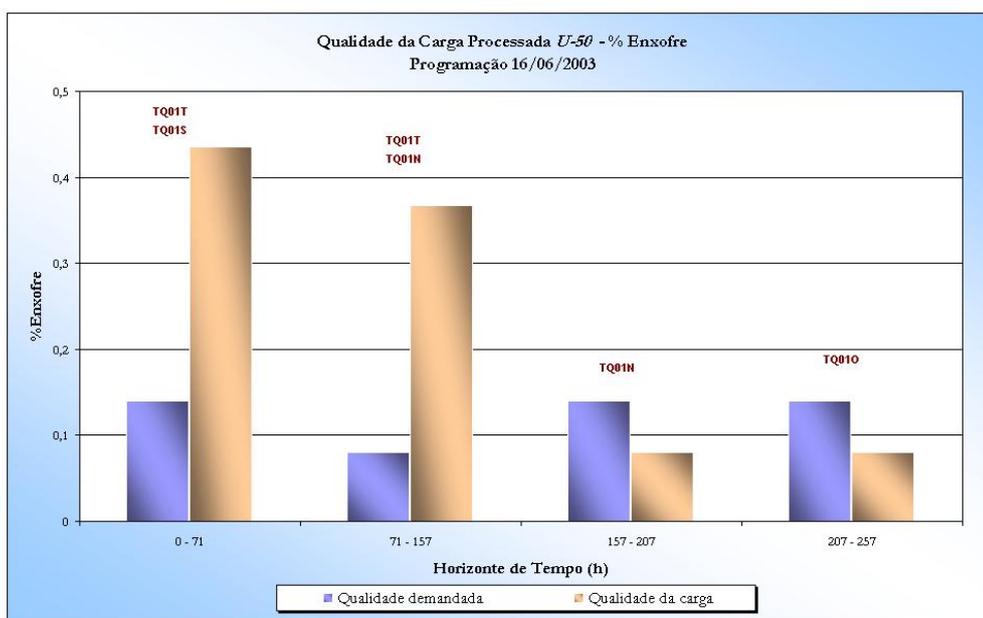


FIGURA C.16: Enxofre da carga U-50 - 16/06/03

Os gráficos C.17 e C.18 apresentam os níveis de estoque de petróleo no terminal e na refinaria, ao longo do horizonte de programação. Verifica-se, ao final do horizonte, o volume total de 36.617m³ de óleo na refinaria e 30.400m³ no terminal.

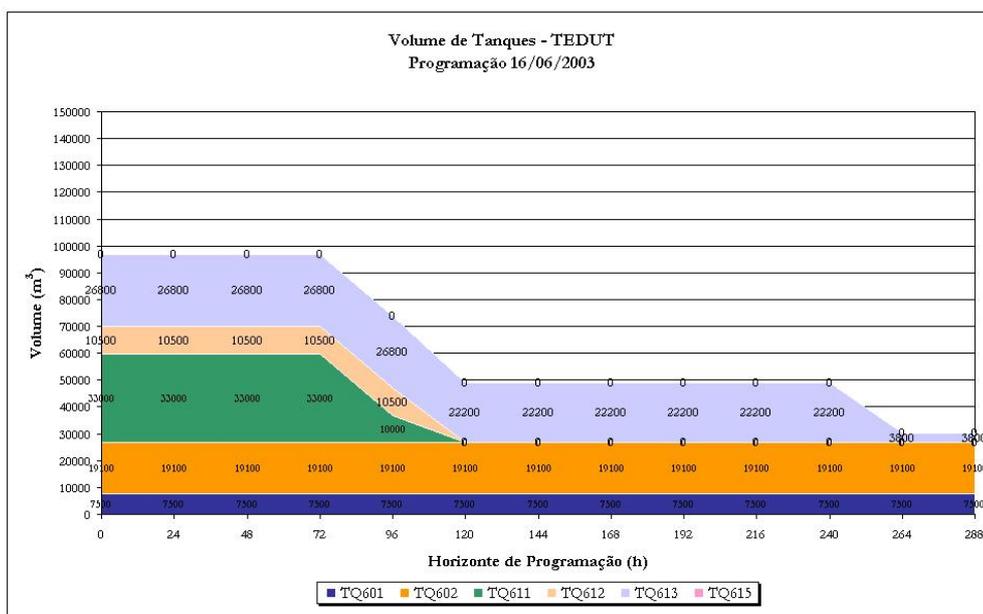


FIGURA C.17: Acompanhamento nível de estoque - TEDUT - 16/06/03

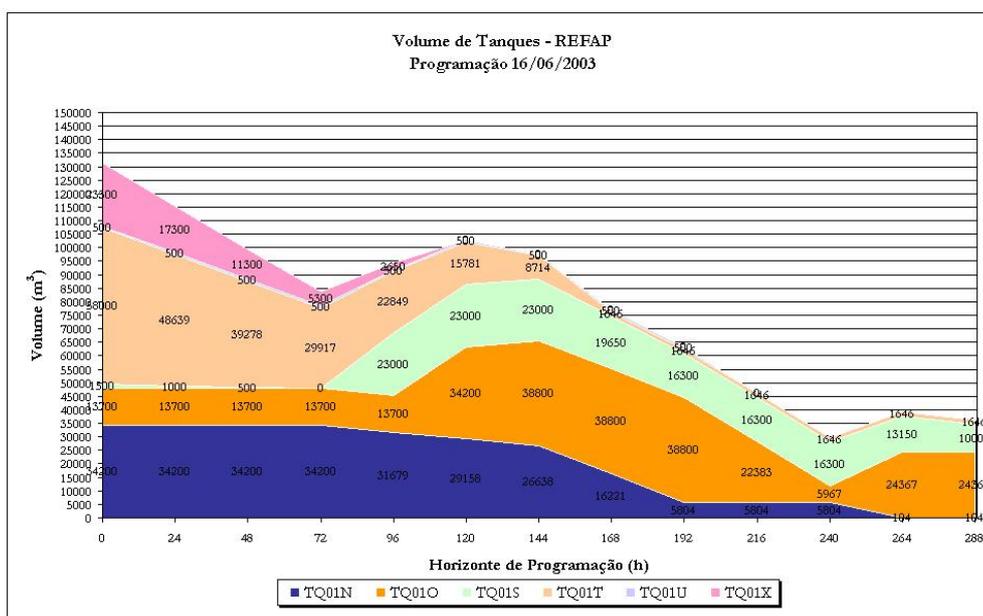


FIGURA C.18: Acompanhamento nível de estoque - REFAP - 16/06/03

A tabela C.13 apresenta o número de trocas de tanques para as operações de envio e recebimento de petróleo.

TABELA C.13: Número de trocas de tanques - 16/06/03

TROCA DE TANQUES		
OPERAÇÃO DUTO	TEDUT	2
	REFAP	1

C.2 Comparação de Resultados

C.2.1 09/06/2003

O gráfico apresentado na figura C.19 compara os resultados para o número de trocas de tanques, discriminados por tipo de tarefa: carga da U-01, carga da U-50, descarregamento de navio e operação do OSCAN (envio - TEDUT e recebimento - REFAP). Observa-se um bom desempenho do algoritmo genético, que forneceu resultados iguais ou melhores para as operações de carga da U-50, descarga de navio e envio de petróleo do TEDUT para a REFAP (operação do duto). Para as demais tarefas o AG apresentou, para esta instância, desempenho pior que o do modelo comparado.

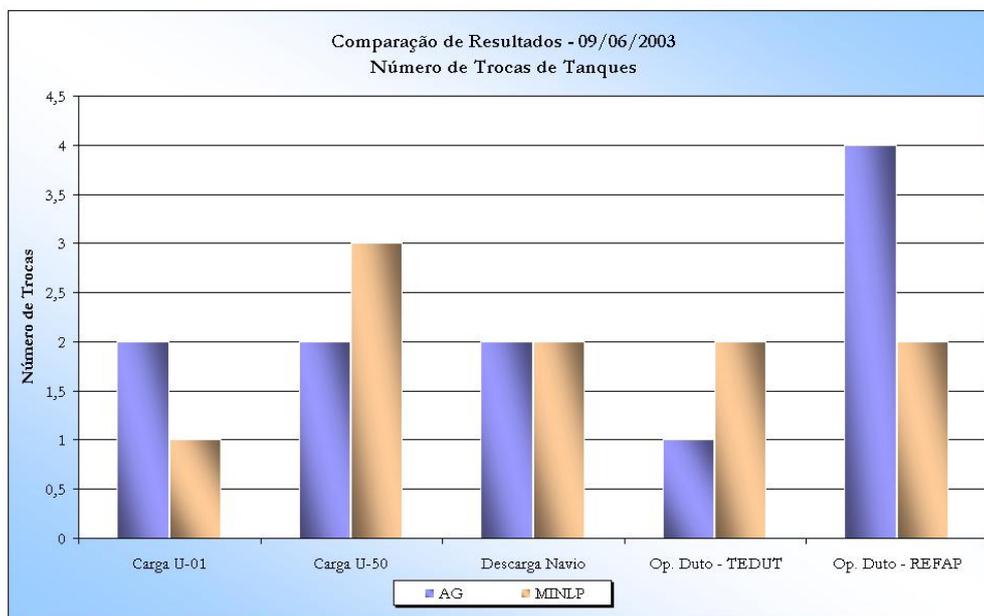


FIGURA C.19: Comparação Número de Trocas de Tanques - 09/06/2003

O resultado do modelo para o percentual de tempo de ocioso de duto foi de 50,5% do horizonte considerado, enquanto que a solução do modelo não linear apresenta 62,4%, como mostra o gráfico da figura C.20.

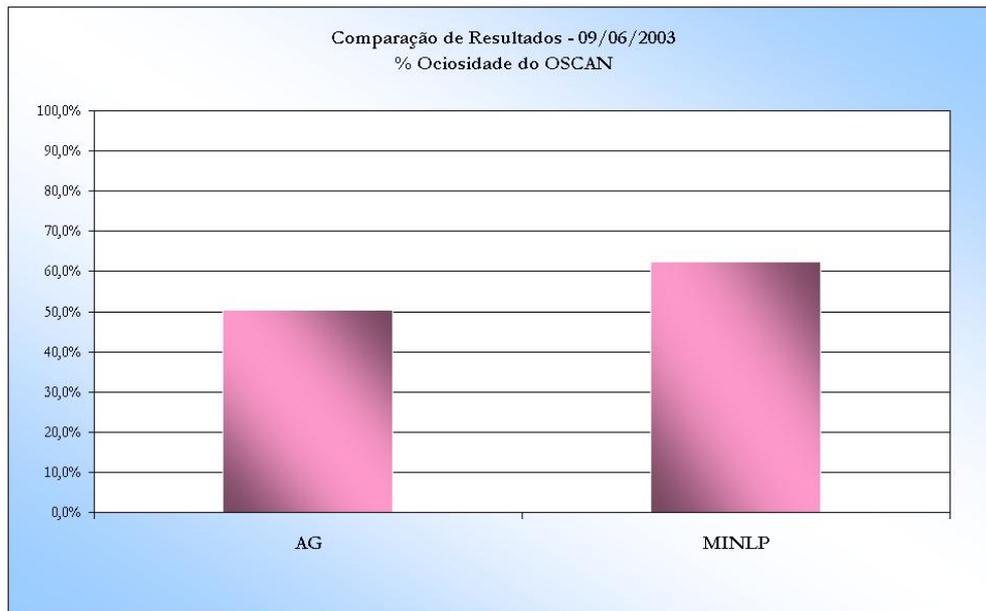


FIGURA C.20: Comparação Ociosidade do OSCAN - 09/06/2003

A figura C.21 mostra o perfil dos níveis de estoque ao final do horizonte de programação para as soluções comparadas. Os valores representam o percentual de volume em tanque no terminal e na refinaria, ou seja, a relação entre o volume armazenado (TEDUT ou REFAP) e o volume total (TEDUT e REFAP).

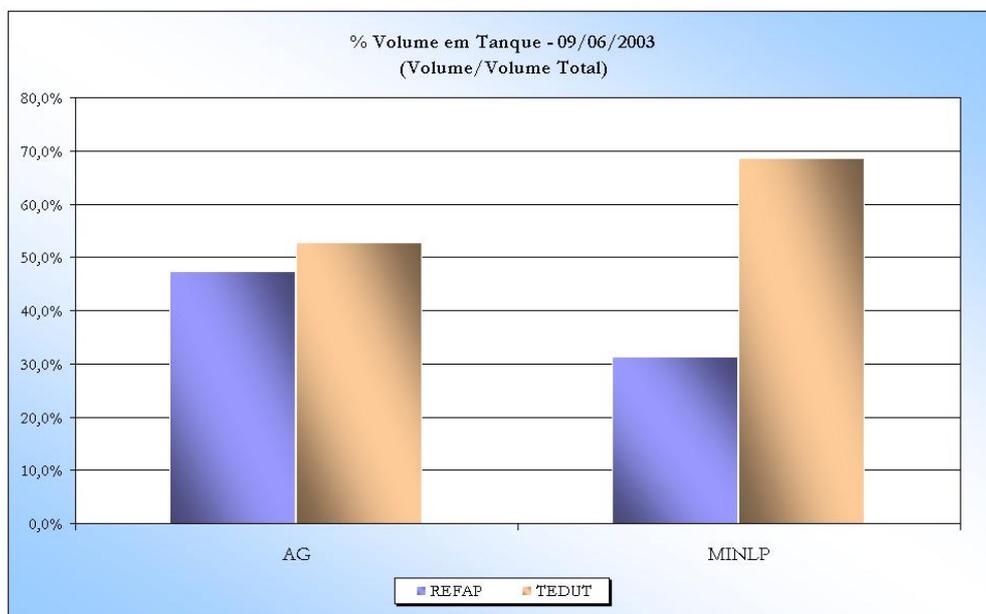


FIGURA C.21: Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 09/06/2003

C.2.2 16/06/2003

Através da figura C.22 verifica-se que o modelo de AG apresentou desempenho inferior apenas para a tarefa de carga na U-01.

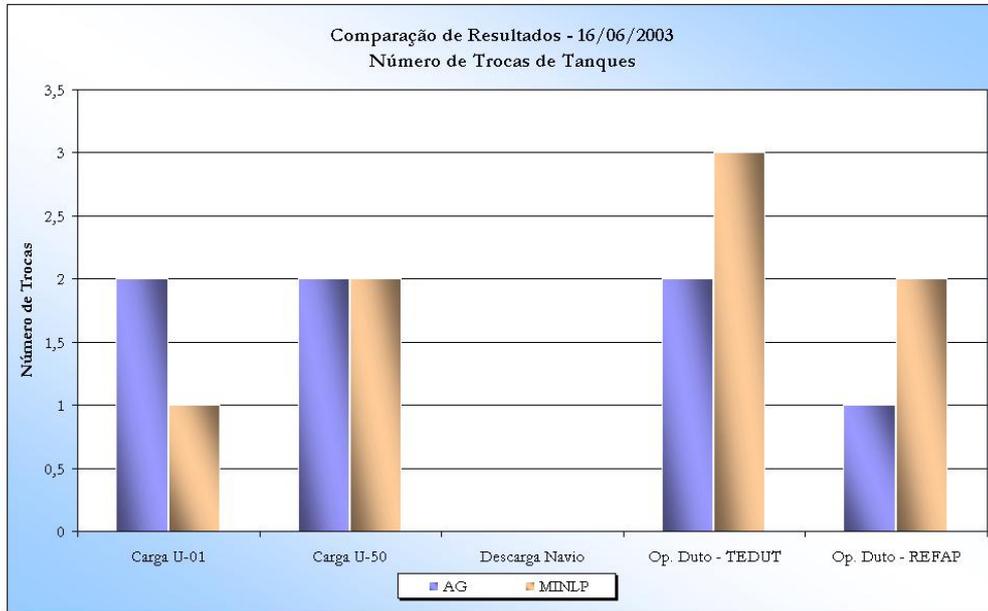


FIGURA C.22: Compara o N mero de Trocas de Tanques - 16/06/2003

Verifica-se a baixa utiliza o do recurso OSCAN (durante apenas 23,1% do tempo). Este fato   observado nos dois modelos (figura C.23).

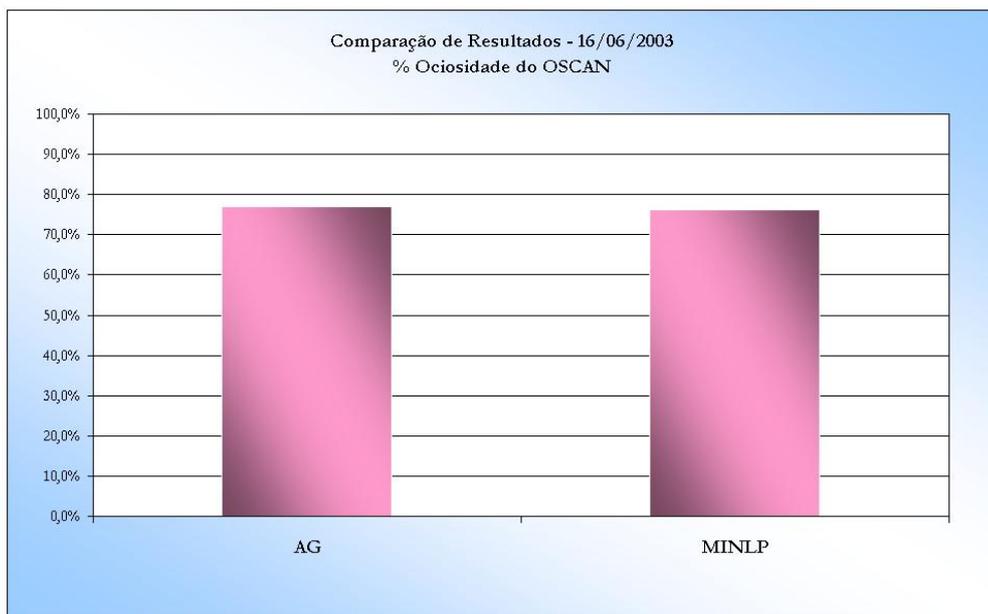


FIGURA C.23: Compara o Ociosidade do OSCAN - 16/06/2003

A figura C.24 mostra o perfil dos níveis de estoque ao final do horizonte de programação para as soluções comparadas. Observa-se que o perfil resultante em ambos os modelos é de volume maior na refinaria que no terminal.

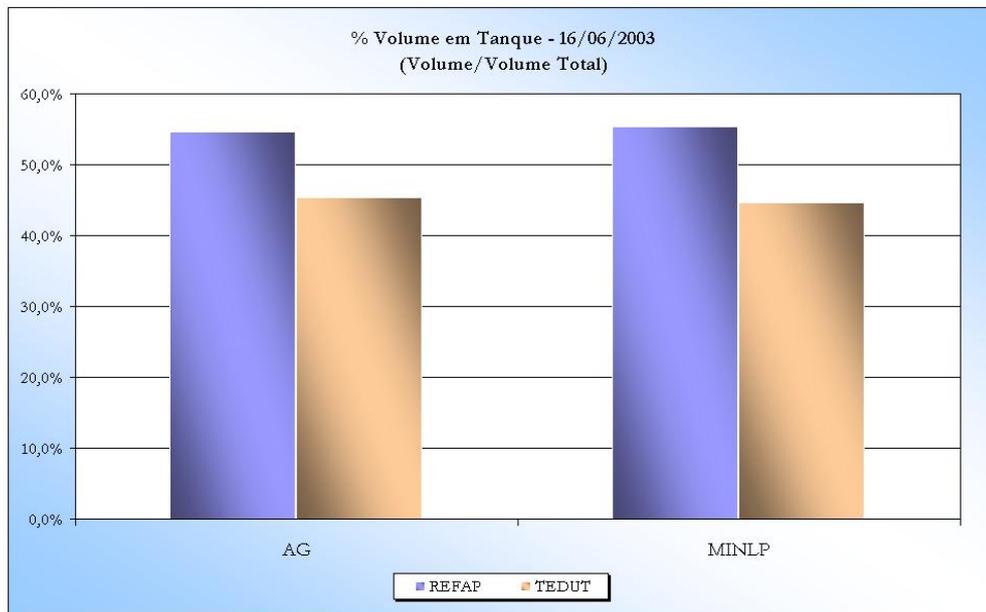


FIGURA C.24: Perfil de Estoque Final de Petróleo (TEDUT e REFAP) - 16/06/2003