

## 5. Estudo de Caso.

### 5.1. Descrição do Protótipo.

A planta escolhida para ser o protótipo de refinaria para este trabalho foi uma planta simples apresentada por Smania (2002), mas que serve como prova para o teste de aplicabilidade do modelo aqui apresentado, já que apresenta todos os tipos de equipamentos e restrições de uma refinaria completa. Esta mini-refinaria pode ser vista na figura 15 abaixo.

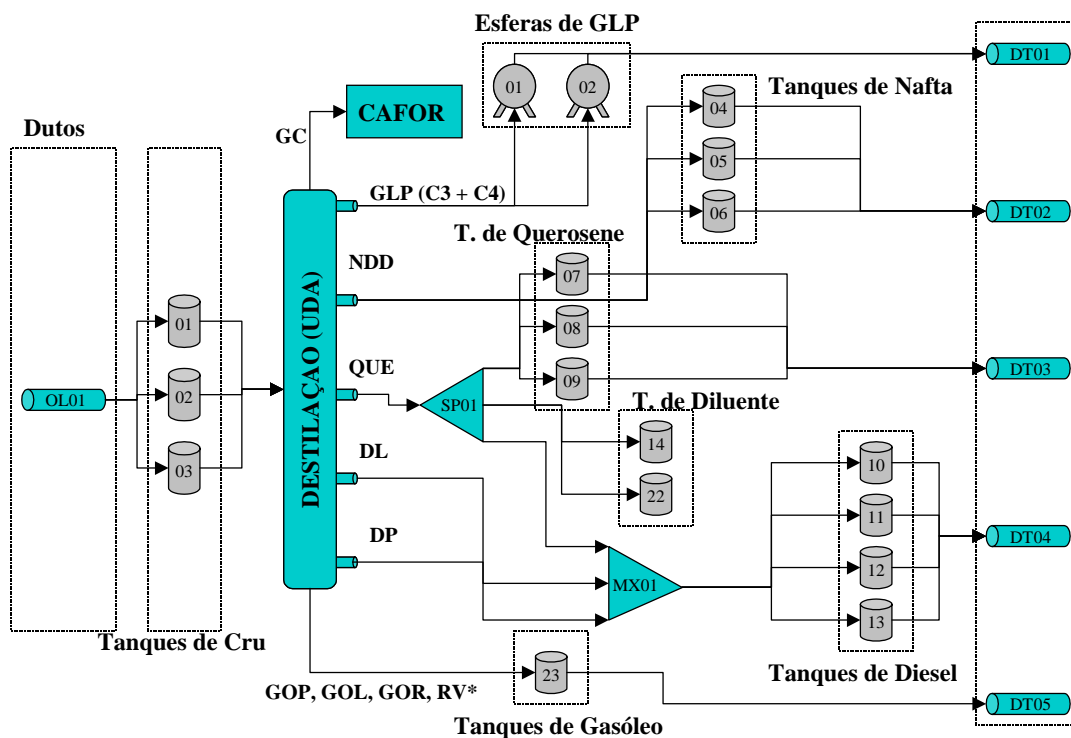


Figura 15 – Refinaria do Protótipo.

## 5.2. Grafo de Precedências.

O grafo de precedências básico para esta refinaria, ou seja, sem mostrar a divisão de atividades, está apresentado abaixo, na figura 16, representando uma situação onde a refinaria recebe dois itens e envia sete, com uma campanha e três manutenções, no horizonte de programação.

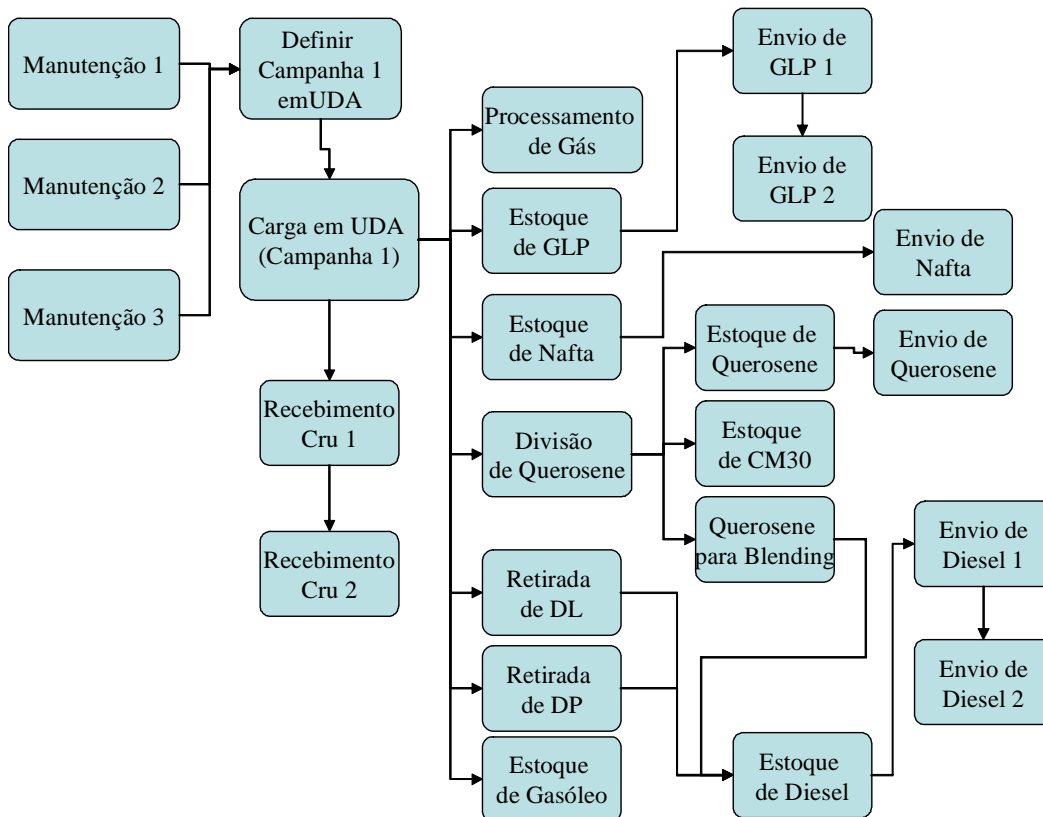


Figura 16 – Exemplo de Grafo de Precedências.

Estas atividades estão sujeitas a aparecer várias vezes no horizonte de programação pois, ao gerar o grafo, o algoritmo parte as atividades em pedaços, como foi mostrado na seção “Representação do Tempo”. Isso é usado para dividir a produção em “lotes”, para evitar que um equipamento fique obrigatoriamente alocado durante todo o horizonte de produção a uma só atividade. Neste caso, o grafo é repetido para cada parte de atividade criada e, então, este novo sub-grafo passa a depender do primeiro, ou seja, se para o grafo da figura 16, a carga na unidade e, conseqüentemente, suas retiradas, precisassem ser divididas em duas partes, teríamos um segundo grafo com as segundas partes das atividades

contando com as mesmas dependências, e cada uma delas dependendo adicionalmente de sua parte anterior.

### 5.3. Cenários estudados

Foram estudados alguns cenários com informações de planejamento diferentes tais como itens, campanhas de unidades e manutenção de equipamentos. A número de dias do cenário (horizonte de programação) também foi variado para mostrar o comportamento do algoritmo diante do aumento do número de atividades a serem programadas.

O estado inicial da planta, ou seja, o conteúdo dos tanques e esferas da refinaria é o mesmo para todos os cenários e é apresentado abaixo.

Equipamento	Mínimo	Máximo	Atual	Composição	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Enxofre (%m)
TQ01	5000	65000	45000	70% Petróleo 1 20% Petróleo 2 10% Petróleo 3	0.8927	0.4963
TQ02	5000	65000	60000	100% Petróleo 2	0.929	0.55
TQ03	5000	65000	30000	20% Petróleo 2 80% Petróleo 3	0.913	0.6695
TQ04	1500	17500	1550	Nafta	0.71	0.0015
TQ05	1500	17500	6500	Nafta	0.71	0.0015
TQ06	1500	17500	10000	Nafta	0.71	0.0015
TQ07	1500	14500	1510	Querosene	0.823	0.13
TQ08	1500	14500	1510	Querosene	0.823	0.13
TQ09	1500	14500	11000	Querosene	0.823	0.13
TQ10	2000	32000	2010	Diesel	0.88	0.45
TQ11	2000	32000	2010	Diesel	0.83	0.31
TQ12	2000	32000	7000	Diesel	0.867	0.4
TQ13	2000	32000	12000	Diesel	0.89	0.5
TQ14	85	1400	95	Diluente	0.85	0.13
TQ22	85	1400	95	Diluente	0.85	0.13
TQ23	6000	90000	26000	Diluente	0.92	0.75
EF01	100	2850	110	GLP	0.55	-
EF02	100	2850	1600	GLP	0.56	-

Tabela 5-1: Estado inicial da planta.

Da mesma forma os produtos processados na refinaria não mudam, assim como os preços de compra e características de crus e os preços de venda e limites de qualidade de produtos acabados.

Produto	Densidade (g/cm <sup>2</sup> )		Enxofre (%m)		Tempo de Preparo	Preço (US\$)
	Máx.	Min.	Máx.	Min.		
Gás Liquefeito de Petróleo	0.565	0.535	-	-	-	
Nafta Petroquímica	0.77	0.71	0.08	-	8 h	370.00
Querosene de Aviação	0.845	0.78	0.16	-	4 h	340.00
Diesel 1	0.86	0.81	0.4	-	4 h	320.00
Diesel 2	0.89	0.83	0.55	-	4 h	310.00
Resíduo	1.06	0.95	1.6	-	-	100.00

Tabela 5-2: Produtos acabados.

Produto	Densidade (g/cm <sup>2</sup> )	Enxofre (%m)	Preço (US\$)
Petróleo 1	0.8927	0.4963	161.00
Petróleo 2	0.929	0.55	150.00
Petróleo 3	0.913	0.6695	120.00

Tabela 5-3: Crus utilizados na planta.

Nesta planta, foram consideradas duas campanhas para a unidade de destilação. A primeira tem como objetivo a produção de querosene de aviação, e é chamada Normal. A segunda campanha envolve a produção de diluente asfáltico e é chamada Qcap.

Porta UDA	Normal			Qcap		
	Petróleo 1	Petróleo 2	Petróleo 3	Petróleo 1	Petróleo 2	Petróleo 3
GC	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001
GLP	0.030	0.010	0.030	0.030	0.010	0.030
NDD	0.150	0.090	0.150	0.180	0.130	0.180
QUE	0.120	0.110	0.100	0.080	0.070	0.070
DL	0.120	0.130	0.120	0.130	0.130	0.120
DP	0.090	0.080	0.070	0.090	0.080	0.070
RAT	0.489	0.578	0.529	0.489	0.578	0.529

Tabela 5-4: Rendimentos de cada cru por campanha (fração volumétrica).

Porta UDA	Propriedade	Normal			Qcap		
		Pet 1	Pet 2	Pet 3	Pet 1	Pet 2	Pet 3
GLP	Densidade	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550	0.550
NDD	Densidade	0.730	0.740	0.750	0.750	0.750	0.760
	Enxofre	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002
QUE	Densidade	0.817	0.834	0.838	0.830	0.845	0.846
	Enxofre	0.130	0.180	0.260	0.130	0.180	0.280
DL	Densidade	0.871	0.893	0.887	0.870	0.891	0.869
	Enxofre	0.310	0.400	0.450	0.310	0.400	0.450
DL	Densidade	0.884	0.900	0.889	0.884	0.900	0.889
	Enxofre	0.460	0.500	0.540	0.460	0.500	0.540
RAT	Densidade	0.969	0.981	0.959	0.969	0.981	0.959
	Enxofre	0.741	0.788	0.888	0.741	0.788	0.888

Tabela 5-5: Propriedades nas correntes de saída por campanha.

A seguir podemos ver os cenários criados para avaliação da aplicabilidade e desempenho do algoritmo co-evolucionário.

#### Informações de Planejamento

Itens de Envio	1/1/03				2/1/03		Vol. Total
	8h	12h	16h	20h	0h	4h	
GLP-1	450						450
GLP-2		450					450
GLP-3			450				450
GLP-4				450			450
GLP-5					250		250
Nafta	1000	1000	1000	1000	1000		5000
QAV	1200	1200	1200	1200	1200		6000
Diesel 2-1			5000				5000
Diesel 2-2				2000			2000
Diesel 1					2000		2000

Itens de Recebimento	8h	12h	16h	20h	0h	4h
-						

Campanhas	8h	12h	16h	20h	0h	4h
UDA	Normal					

Manutenção	8h	12h	16h	20h	0h	4h
-						

Figura 17 – Cenário 1.

O cenário 1, apresentado na figura 17, é um cenário bastante simples, de um dia, com apenas uma campanha e sem nenhuma manutenção. Mas, apesar disso, é um cenário muito difícil de se programar, por alguns aspectos:

1. A demanda de GLP é muito maior que o estoque inicial do produto, e a vazão de produção desta fração na unidade de destilação (UDA), tendo em vista os rendimentos por petróleo cru disponível, é bem inferior à vazão demandada;
2. Só um tanque de diesel (TQ11) está dentro das especificações para “Diesel 1”, e não tem volume suficiente para atender o item de Diesel 1. Se o cru mais pesado (Petróleo 3) for utilizado para dar carga na unidade no momento que o diesel for destinado ao TQ11, provavelmente não haverá um tanque sequer especificado para atender tal item.

## Informações de Planejamento

Tempo	1/1/03				2/1/03		
Itens de Envio	8h	12h	16h	20h	0h	4h	Vol. Total
GLP-1	450						450
GLP-2		450					450
GLP-3			450				450
GLP-4				450			450
GLP-5					250		250
Nafta	1000	1000	1000	1000	1000		5000
QAV	1200	1200	1200	1200	1200		6000
Diesel 2-1			5000				5000
Diesel 2-2				2000			2000
Diesel 1					2000		2000

Itens de Recebimento	8h	12h	16h	20h	0h	4h
-						

Campanhas	8h	12h	16h	20h	0h	4h
UDA	Normal				Qcap	

Manutenção	8h	12h	16h	20h	0h	4h
TQ03						
TQ11						
TQ07						

Figura 18 – Cenário 2.

O cenário 2, apresentado na figura 18, tem os mesmos itens do cenário 1, com as mesmas dificuldades de atender à demanda, sendo que, desta vez, há dois equipamentos em manutenção e uma troca de campanha. Este cenário foi concebido desta forma para testar:

1. O efeito da troca de campanha na programação e principalmente nos volumes e qualidades dos produtos;
2. O efeito da manutenção como uma restrição de uso de recursos para as tarefas a serem programadas pelo algoritmo. É interessante observar que os tanques TQ03, TQ11 e TQ07 foram escolhidos para manutenção por terem sido sempre selecionados pelo algoritmo nestes intervalos de tempo. A situação do TQ11 é particularmente dramática já que é o único que pode satisfazer o item de Diesel 1, e estará fora de operação durante um tempo precioso para conseguir volume suficiente para enviar.

## Informações de Planejamento

Tempo	1/1/03					2/1/03					3/1/03					4/1/03					5/1/03					6/1/03											
Itens de Envio	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	
GLP	250	250	250	250	250			500									500																		500		
Nafta	5000					3000					3000					3000					3000																
QAV	6000					2400					2400					2400					2400																
Diesel 2			5000	2000				4000	2400					4000	2400																				4800		
Diesel 1					2000																																
Itens de Recebimento	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h							
PET1						18000				18000																									36000		
PET3																																					
Campanhas	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h							
UDA	Normal					Qcap					Normal					Qcap					Normal																
Manutenção	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h	8h	12h	16h	20h	0h	4h							
-																																					

Figura 19 – Cenário 3.

O cenário 3, apresentado na figura 19, é um cenário de 5 dias, que serve para validar a utilidade do algoritmo em realizar a programação de um volume de atividades próximo ao real. Este cenário tem os mesmos itens do cenário 1, com as mesmas dificuldades de atender à demanda no primeiro dia, sendo que, a partir daí, tem mais quatro dias com vários itens de recebimento e uma campanha diferente a cada dia. As demandas ao longo destes quatro dias são bem parecidas, já que o interesse aqui é analisar o desempenho e o tempo de convergência do algoritmo à medida que o problema cresce.

Quase todas as características da planta apresentadas acima, assim como algumas informações de planejamento apresentadas em cada um dos cenários foram retiradas de Smania (2002).

## 5.4. Resultados

### 5.4.1. Análise de Desempenho.

Foram realizados experimentos com o algoritmo co-evolucionário e com busca exaustiva utilizando a mesma representação e heurísticas presentes no algoritmo genético. Foram rodados dez experimentos, cujos gráficos de desempenho comparativo serão apresentados adiante.

Cabe ressaltar que a busca exaustiva somente não utilizou os operadores genéticos, tendo todas as outras facilidades do algoritmo como, por exemplo, gerar somente soluções válidas. Para se ter uma idéia da dificuldade deste problema, a busca exaustiva, em 10 experimentos de 6.000 iterações (ou

indivíduos), nunca conseguiu sequer uma solução que atendesse os itens sem atraso e desvio. Quando a solução conseguia atender a um critério (volume disponível) não atendia ao outro (desvio de especificação).

A seguir são apresentados os gráficos de desempenho para cada cenário. O primeiro gráfico de cada cenário apresenta a função objetivo como um todo, e os demais mostram os objetivos separadamente.

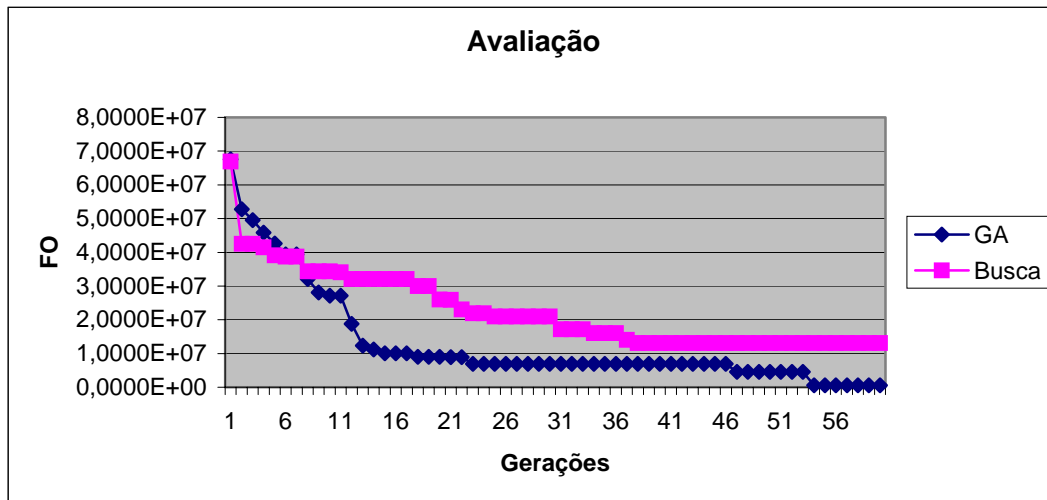


Figura 20 – Desempenho do Algoritmo em relação à busca exaustiva (Cenário 1).

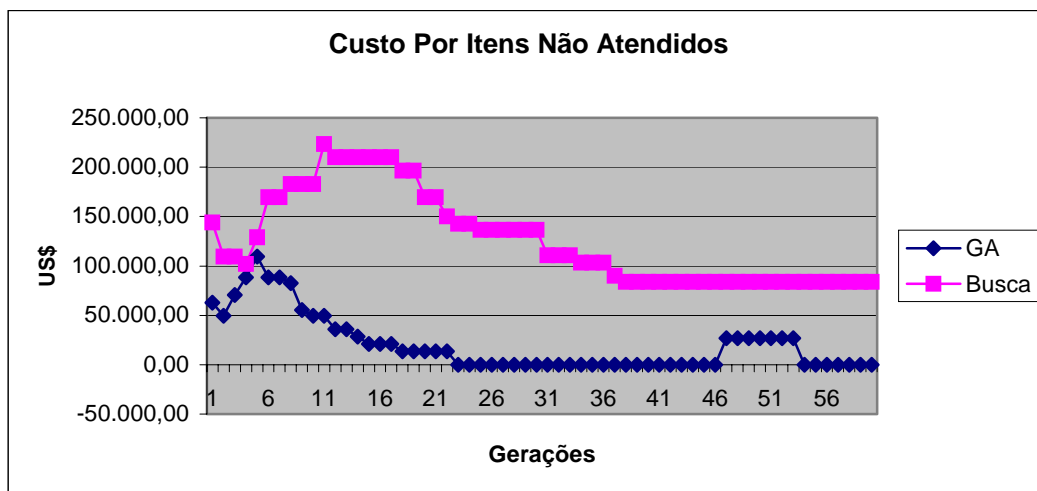


Figura 21 – Custo por Atraso nos Itens – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 1).



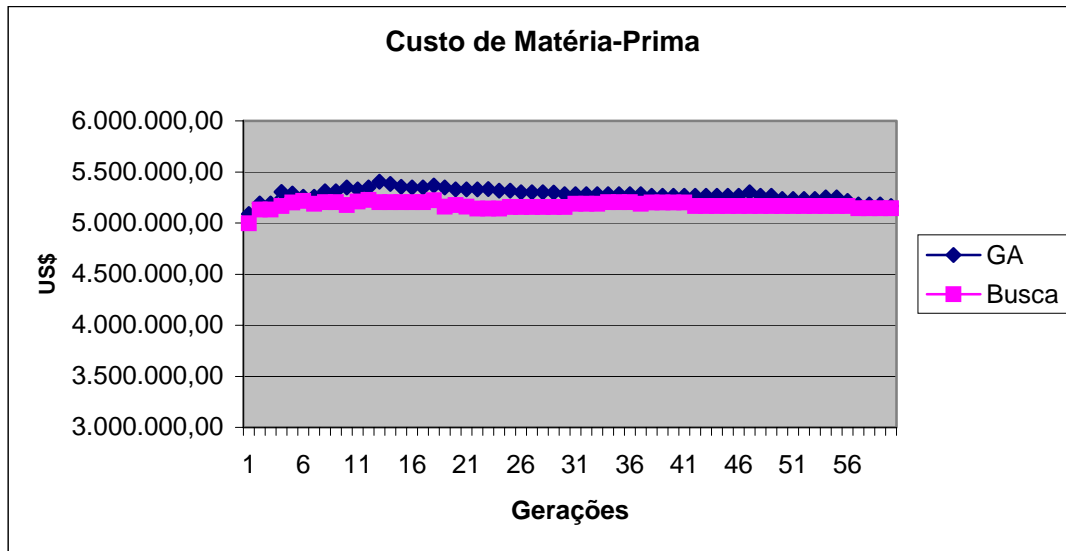


Figura 22 – Custo de Matéria-Prima – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 1).

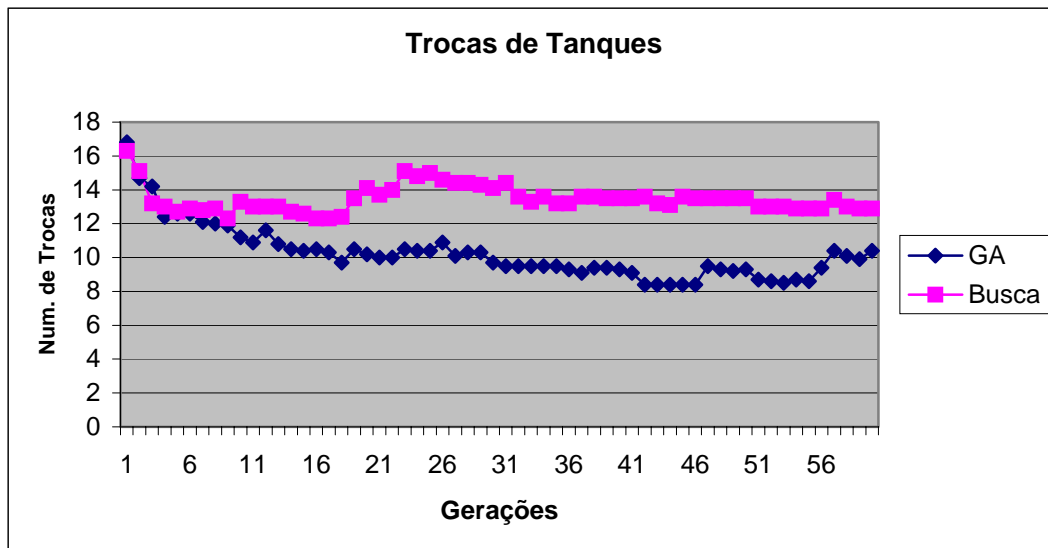


Figura 23 – Trocas de Tanques – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 1).

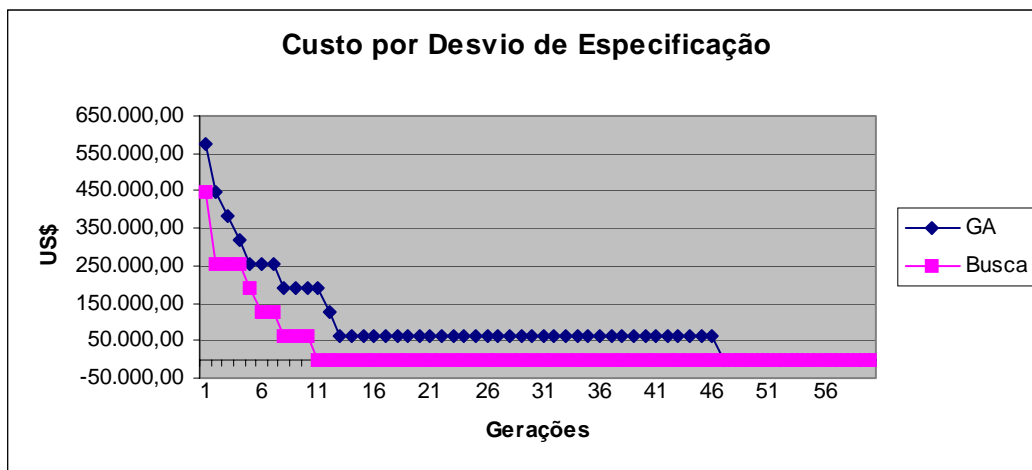


Figura 24 – Custo por Desvio de Especificação – Algoritmo X Busca (Cenário 1).

É importante notar que, ao se examinar cada um dos aspectos separadamente, às vezes parece que a busca exaustiva está indo tão bem quanto ou até melhor que o algoritmo evolucionário. Mas ao se combinar cada um dos objetivos, fica claro que as soluções são muito inferiores à apresentada pelo algoritmo genético. Por exemplo, se um algoritmo abre mão de atender um item, ou aceita um número enorme de trocas ou, ainda, entrega itens fora de especificação, ele pode conseguir economizar em matéria-prima.

Ao se acompanhar a evolução dos objetivos na busca exaustiva, é possível identificar que o algoritmo tem um comportamento “guloso”, tentando atender os objetivos que sejam ao mesmo tempo fáceis (com poucas combinações possíveis) e com um grande impacto na função objetivo. O exemplo mais claro disto é como ele minimiza rapidamente o custo por desvio de especificação, que ao mesmo tempo pode ser facilmente alcançado (se não considerar os outros objetivos) e tem um peso muito grande no valor final da avaliação. O custo de matéria prima é um outro exemplo, onde é muito simples se chegar ao petróleo mais barato, por se ter algumas dezenas de combinações possíveis, e preços tão diferentes. Por exemplo, se a programação usasse só o cru do tanque TQ03, que é 80% petróleo 3, o custo de matéria-prima seria US\$ 4.615.200,00, número muito abaixo do mínimo encontrado ao se levar em conta os outros objetivos. Ao se analisar os gráficos destes dois objetivos pode-se perceber que a busca se agarra logo à solução que minimiza estes objetivos. À medida que outras soluções são encontradas, a busca abandona um pouco a minimização do custo da matéria-prima, já que este premia muito pouco a avaliação da solução.

No algoritmo genético percebe-se que a convergência ocorre de forma diferente, mais gradual, e sempre levando em conta todos os objetivos. O algoritmo parece estar primeiro realizando uma busca mais global no espaço das soluções e menos gananciosa no início e, então, quando está próximo das melhores soluções, faz uma busca local nos objetivos mais sutis, como minimização das trocas de tanques. Este objetivo é mais sutil por que, ao se fixar qual cru dará carga, e quais tanques entregarão os itens, ainda resta uma enorme combinação de trocas de tanques que atendem tais objetivos, e o algoritmo evolucionário tem que conseguir vislumbrar estas oportunidades de pequena melhora de aptidão, sem perder o material genético que torna a solução boa nos

outros aspectos. Já no custo por não atendimento dos itens, o algoritmo genético é muito superior à busca exaustiva, mas não pela sua capacidade de realizar busca local de forma eficiente, mas sim pela dificuldade em se atender os itens de GLP neste cenário. Isto é fácil perceber, pois mesmo o CCGA sempre tem, nas primeiras gerações, um custo de US\$ 135.000,00 ou 75.000,00 que correspondem aos itens GLP-4 e GLP-5, respectivamente. E a busca não consegue minimizar este custo sem abrir mão da especificação (desvio). No CCGA fica claro que cada um dos objetivos contemplados tem sua informação genética preservada e, portanto, apesar de parecer evoluir mais lentamente no início, o algoritmo evolui na direção que realmente interessa para o problema.

Para este cenário foram realizados experimentos também para se decidir qual grupo de operadores utilizar. Cruz (2003) mostra que o operador de *crossover* de ordem (OX) não evolui bem o problema, e que os operadores de *crossover* de mapeamento parcial (PMX) e de ciclo (CX) têm um comportamento muito superior.

Talvez pela representação similar e pelo tipo de problema e objetivos, o comportamento do operador PMX foi muito parecido com o apresentado por Cruz (2003). Mas, neste caso, o operador CX teve um comportamento bem inferior ao PMX. O gráfico sugere que o operador OX tem um desempenho médio superior ao CX. Mas, ao se analisar os dados, foi possível verificar que o OX praticamente não evolui as espécies neste problema, ou seja, o melhor indivíduo nas primeiras gerações permanece até a última. A seguir apresenta-se ver um gráfico que compara a aplicação de cada um dos operadores com 100% de probabilidade e a busca exaustiva. Estes gráficos apresentam resultados da média de 5 experimentos com cada uma das configurações.

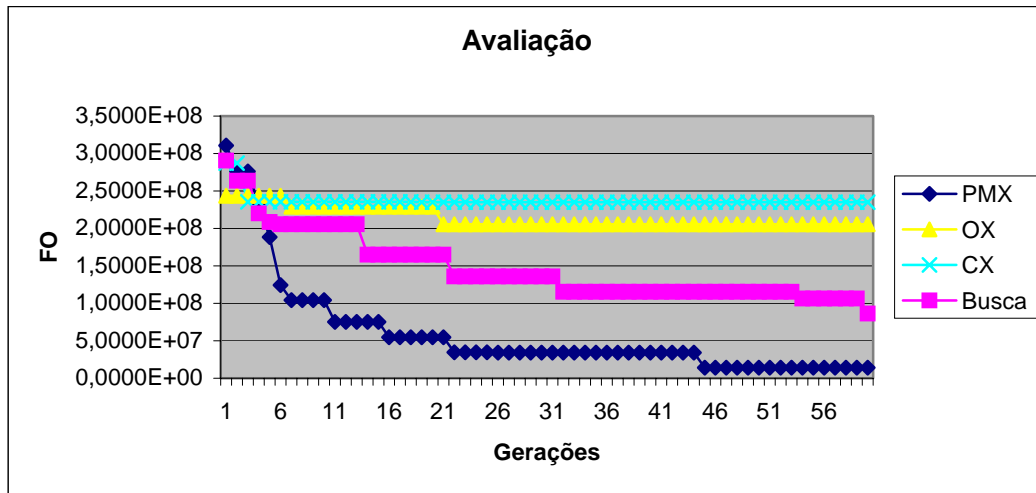


Figura 25 – Avaliação dos operadores (Cenário 1).

A seguir são mostrados os gráficos de desempenho para o cenário 2. Uma análise destes resultados é feita logo em seguida, a exemplo do que foi feito para o cenário 1.

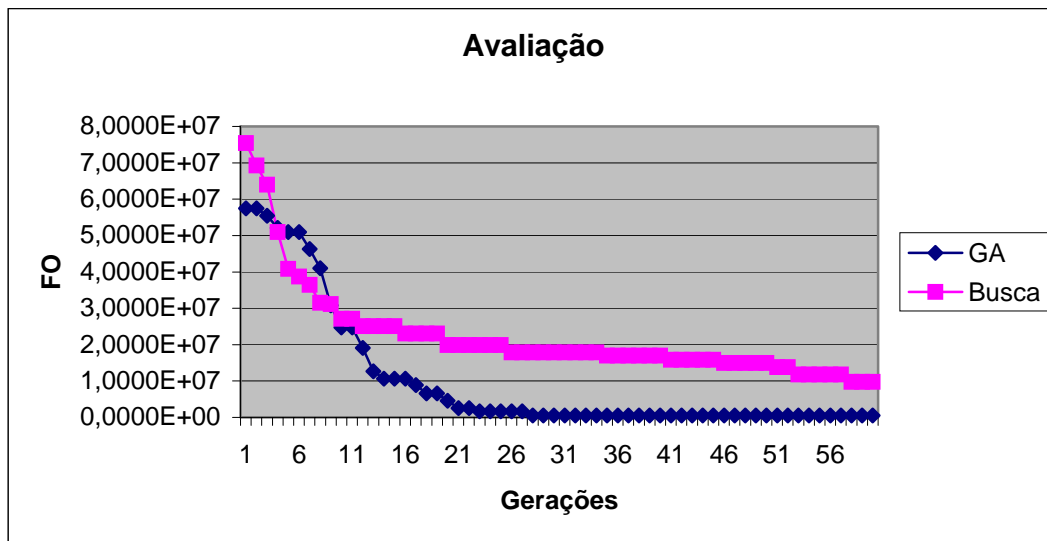


Figura 26 – Desempenho do Algoritmo em relação à busca exaustiva (Cenário 2).

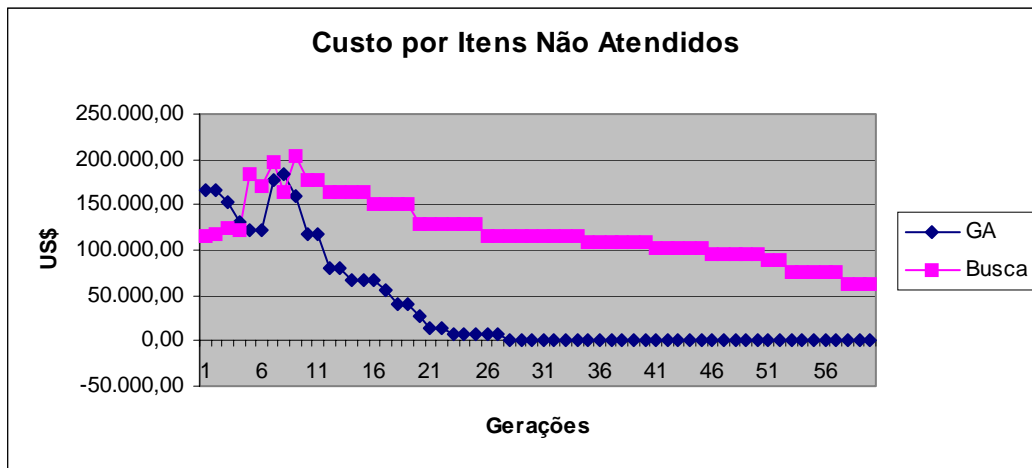


Figura 27 – Custo por Atraso nos Itens – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 2).

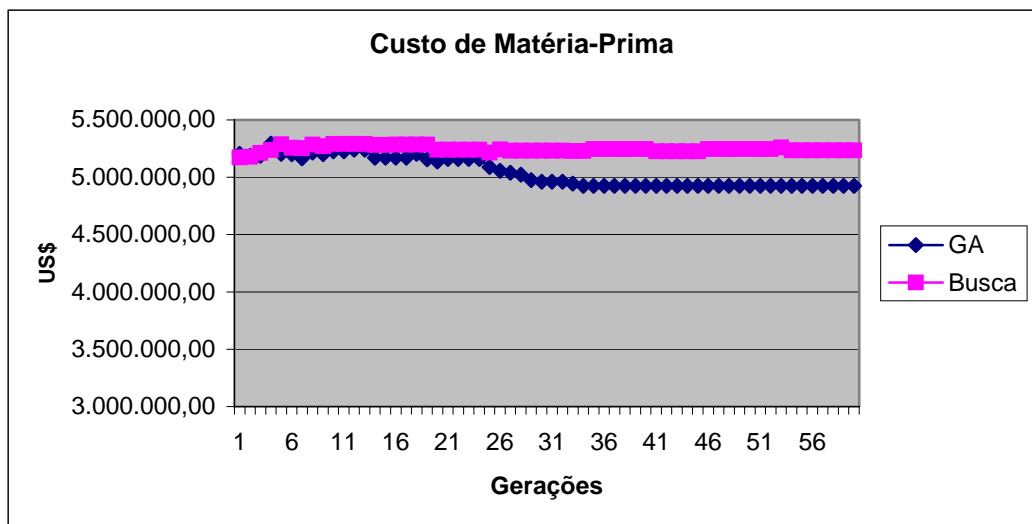


Figura 28 – Custo de Matéria-Prima – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 2).

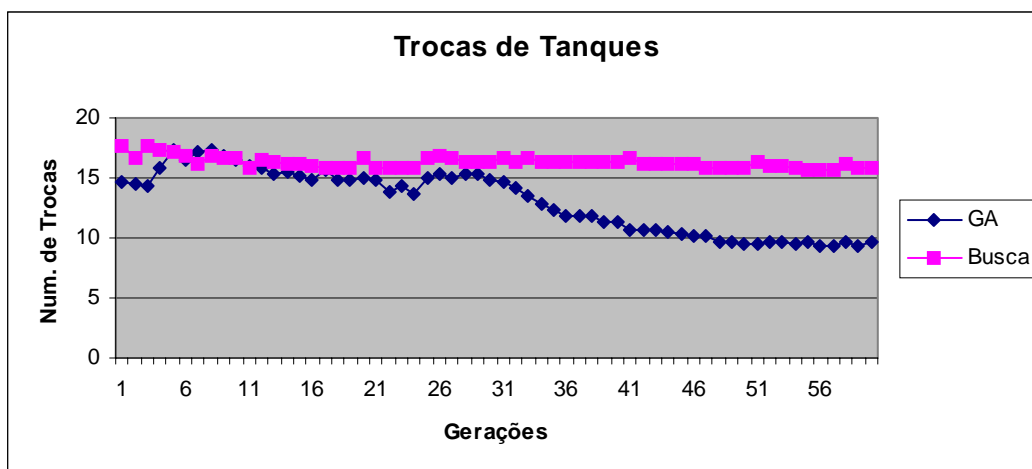


Figura 29 – Trocas de Tanques – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 2).

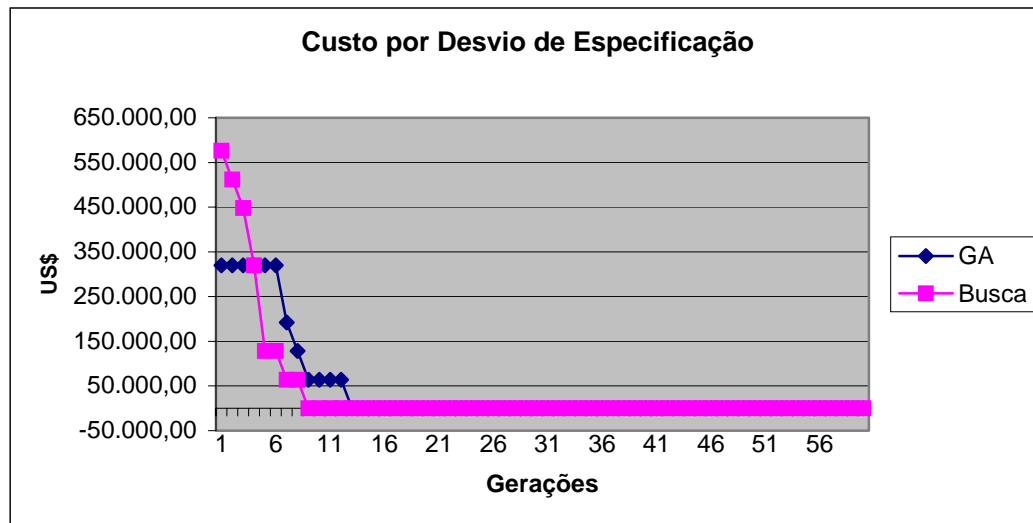


Figura 30 – Custo por Desvio de Especificação – Algoritmo X Busca (Cenário 2).

Ao se analisar os resultados do cenário 2, é possível notar que ambos têm um desempenho melhor que no cenário 1, mas a grande diferença entre o CCGA e a busca exaustiva permanece. As restrições de disponibilidade de equipamentos em virtude da programação de atividades de manutenção reduzem o espaço de busca das soluções, tornando esta busca mais direta.

É importante ressaltar que o algoritmo genético consegue atender os itens normalmente, inclusive o item de diesel que, tendo em vista a manutenção do TQ11 no início do cenário (8-12h) e a restrição de tempo de preparação de 4 horas para a venda de diesel, o TQ11 só pode receber diesel da UDA de 12 às 20 h, já que o item de “Diesel 1” é enviado a 0 h.

De resto, toda a análise feita para o cenário 1 em relação ao comportamento das curvas dos objetivos é válida para este cenário também.

A seguir são apresentados os gráficos de desempenho para o cenário 3 e, da mesma forma como nos cenários anteriores, o desempenho em relação a busca exaustiva são comentados em seguida.

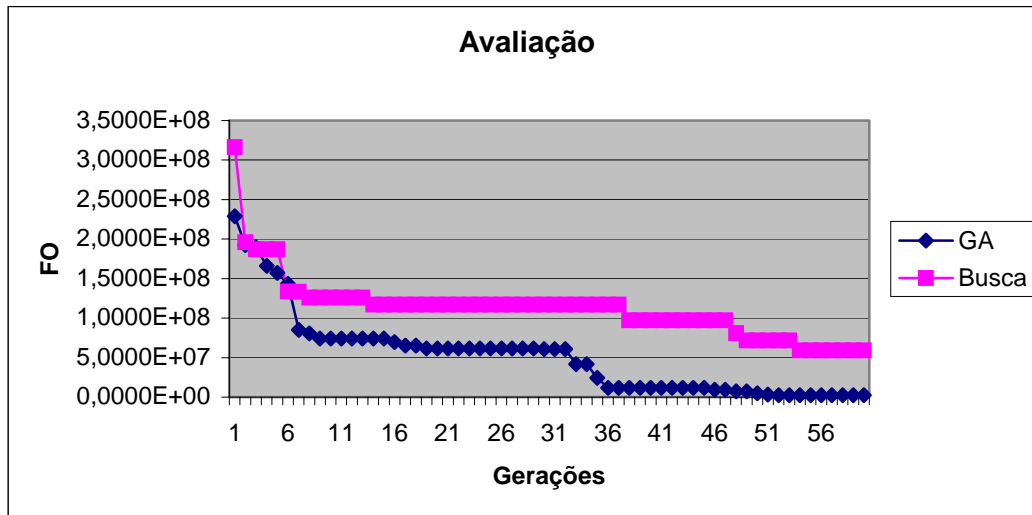


Figura 31 – Desempenho do Algoritmo em relação à busca exaustiva (Cenário 3).

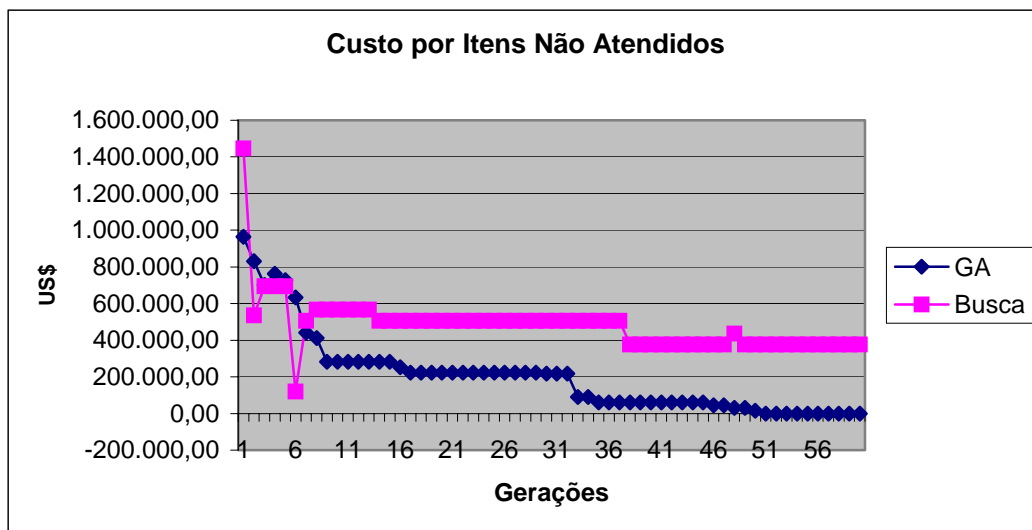


Figura 32 – Custo por Atraso nos Itens – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 3).

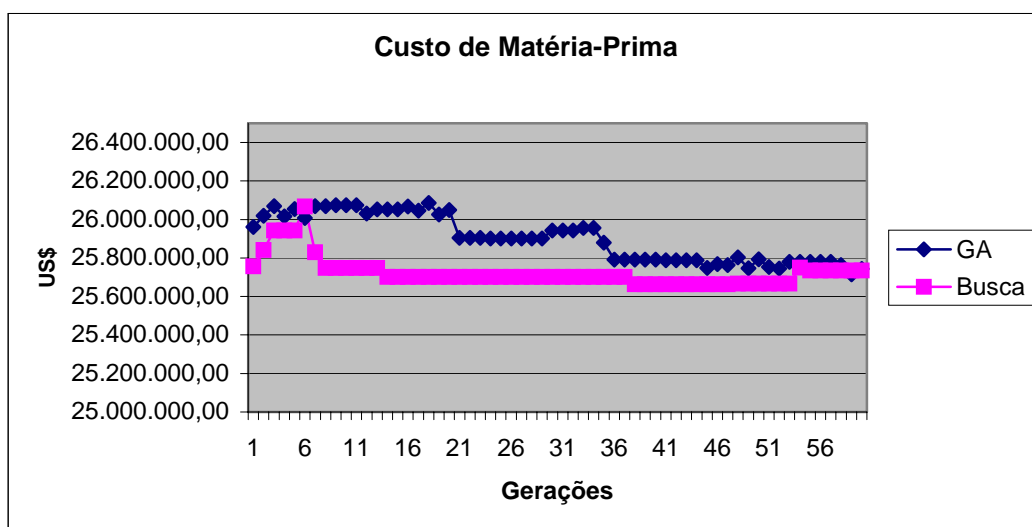


Figura 33 – Custo de Matéria-Prima – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 3).

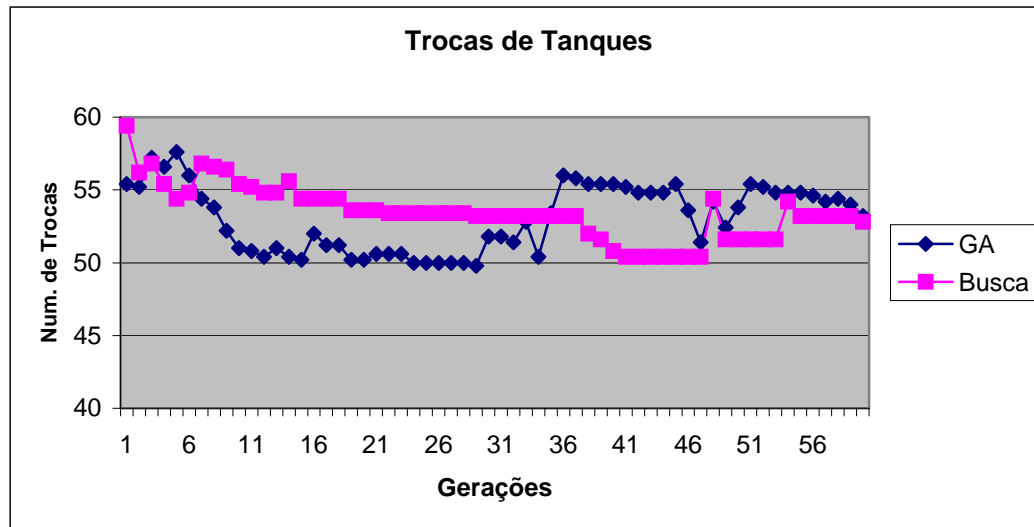


Figura 34 – Trocas de Tanques – Algoritmo X Busca exaustiva (Cenário 3).

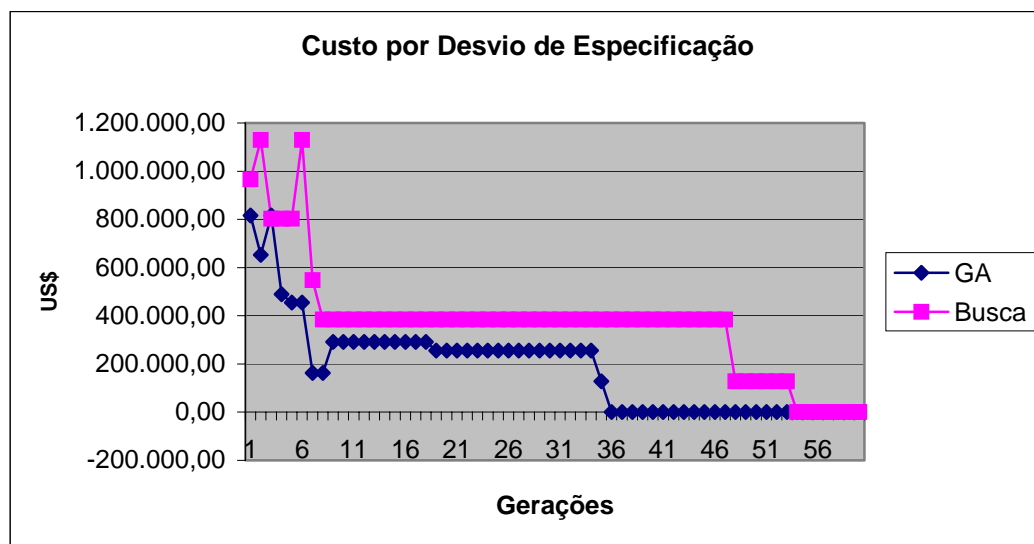


Figura 35 – Custo por Desvio de Especificação – Algoritmo X Busca (Cenário 3).

Devido ao longo tempo de processamento para o cenário 3, principalmente no caso da busca exaustiva (em média 5.600s ou 1h34min), os gráficos para este cenário apresentam a média para 5 experimentos.

É possível observar por estes gráficos que, mais uma vez, o algoritmo genético teve um desempenho bem superior à busca exaustiva, em média. Como já foi esclarecido anteriormente, o objetivo principal deste cenário é comprovar que, mesmo para cenários maiores, o tempo de processamento não torna o uso do algoritmo inviável, como na maioria das abordagens para problemas de *scheduling* do mundo real.



A seguir é apresentada uma tabela com os resultados das melhores soluções encontradas em 60 gerações de 100 indivíduos, para o algoritmo genético co-evolucionário. O maior interesse nesta análise é avaliar o tempo de processamento para os diferentes cenários apresentados.

	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>
<b>Num. Gerações</b>	60	60	60
<b>População</b>	100	100	100
<b>Volume Máx. – Itens (m<sup>3</sup>)</b>	6000	6000	6000
<b>Volume Máx. – Carga UDA (m<sup>3</sup>)</b>	6000	6000	12000
<b>Atividades Geradas</b>	83	86	228
<b>Tempo (s)<sup>1</sup></b>	122	167	1463
<b>Itens não atendidos (US\$)</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Custo de Mat. Prima (US\$)</b>	4,880,400.00	4,880,400.00	25,156,357.89
<b>Num. de Trocas</b>	4	6	32
<b>Desvio (US\$)</b>	0.00	0.00	0.00
<b>Avaliação</b>	492040.0000	494040.0000	2547635.7895

Tabela 5-6: Desempenho geral da melhor solução encontrada para cada cenário.

É importante ressaltar o papel do parâmetro de volume máximo transferido, que determina o número de atividades que serão programadas pelo algoritmo, já que o desempenho do algoritmo depende disto. Isto acontece porque, na representação adotada, o número de genes dos cromossomos das duas espécies é dependente do número de atividades. Por isso, no cenário 3, o volume máximo foi aumentado para 12000 m<sup>3</sup>. Este valor criou atividades de carga e retirada da unidade de processo com 8 horas de duração, o que é até pouco para a maioria das atividades de uma refinaria. Desta forma, há espaço para reduzir o tempo de processamento para cenários maiores.

<sup>1</sup> Num PC Pentium III – 866 Mhz e 256 Mb de memória.

### 5.4.2. Programação Gerada pelo Decodificador.

Um trecho de programação gerada pelo sistema pode ser visto na figura 36. Elas correspondem às ordens de produção que são passadas para a operação da refinaria.

```

1/1/2003 08:00:00 - 2/1/2003 08:00:00 -> Operation Mode 'Normal (01/01/03 - 02/01/03)' on the 'UDA' Process Unit.
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Feeding Unit 'UDA' from storage 'TQ01' at a flow rate of 1500 m3/h (Volume = 6000 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Delivering Item 'GLP-1' from storage 'EF02' to pipeline 'DT01' at a flow rate of 112.5 m3/h (Volume = 450 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 2/1/2003 04:00:00 -> Delivering Item 'QAV' from storage 'TQ09' to pipeline 'DT03' at a flow rate of 300 m3/h (Volume = 6000 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 2/1/2003 04:00:00 -> Delivering Item 'NPTQ' from storage 'TQ05' to pipeline 'DT02' at a flow rate of 250 m3/h (Volume = 5000 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Gas Processing) from 'UDA' to 'CAFOR' at a flow rate of 1.8 m3/h (Volume = 7.2 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Store LPG) from 'UDA' to 'EF01' at a flow rate of 39 m3/h (Volume = 156 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Store Naptha) from 'UDA' to 'TQ04' at a flow rate of 207 m3/h (Volume = 828 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Store Gasoil) from 'UDA' to 'TQ23' at a flow rate of 766.2 m3/h (Volume = 3064.8 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Split Kerosene) from 'UDA' to 'SP01' at a flow rate of 174 m3/h (Volume = 696 m3).
1/1/2003 08:00:00 - 1/1/2003 12:00:00 -> Sending (Store Kerosene) from 'SP01' to 'TQ07' at a flow rate of 174 m3/h (Volume = 696 m3).

```

Figura 36 – Trecho de ordens de produção.

As ordens de produção constituem a principal saída do sistema, pois representam a programação das atividades. De uma forma mais amigável, pode-se representar as tarefas no tempo como um gráfico de Gantt, que é utilizado em vários *softwares* de planejamento (como por exemplo, o MS Project), e por praticamente todos os programadores de produção, para poder visualizar o horizonte e a utilização dos tanques.

Outro resultado importantíssimo é a situação dos equipamentos ao longo do horizonte de produção, tais como volume nos tanques, vazão das portas, propriedades dos produtos nos tanques, etc. Estes dados são importantes para o programador de produção acompanhar e verificar o impacto do *scheduling* realizado no estado da planta.

A seguir são apresentados estes resultados para os cenários 1 e 2. Para o cenário 3, não foram construídos os gráficos apresentados para os outros cenários porque, pelo tamanho deste cenário, o gráfico de Gantt teria que ser muito grande para ser legível e, como o objetivo deste cenário é comprovar que horizontes maiores podem ser programados, a análise de desempenho da seção 5.4.1 é suficiente.

#### 5.4.2.1. A Programação do Cenário 1.

A seguir é apresentada a programação gerada para o cenário 1. em formato de gráfico de Gantt, como já explicado anteriormente.

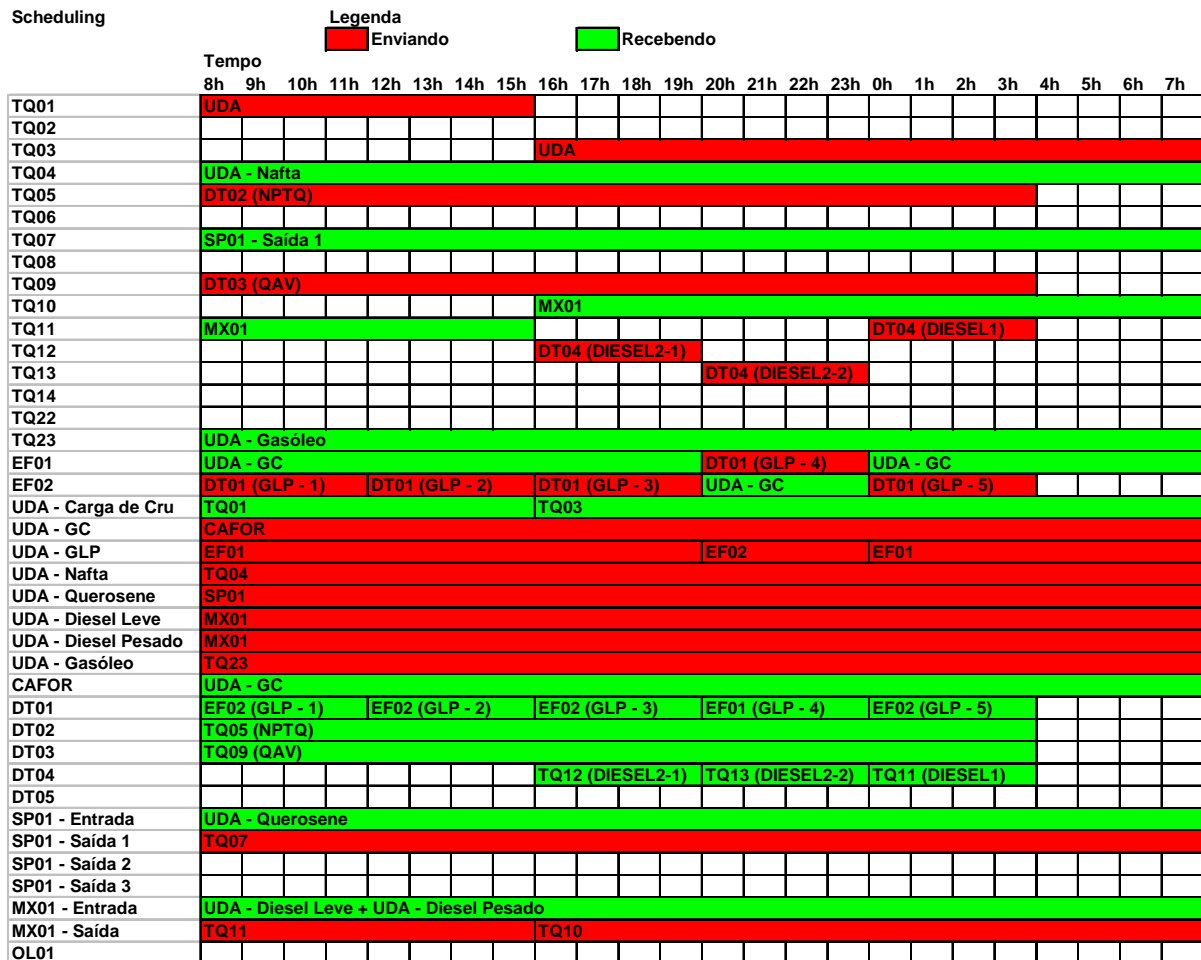


Figura 37 – Gráfico de Gantt com toda a programação (Cenário 1).

É interessante notar que algoritmo realmente aprendeu como se comportar para atender todos os objetivos do problema. Como foi mostrado anteriormente,

ao se apresentar os cenários, neste cenário o único tanque que está especificado para enviar “Diesel 1” é o TQ11, só que ele tem somente  $10\text{m}^3$  de volume disponível no início do cenário (ver tabela 5-1). Mesmo assim ele ainda é o único cujo lastro não forçaria o diesel recebido a ficar fora de especificação. Ao mesmo tempo, o TQ01 é o único tanque que tem um petróleo leve o suficiente para produzir tal diesel em campanha normal, onde o diesel é resultado da mistura das correntes DL e DP da UDA. Ao se analisar o Gantt acima, é possível notar que em todo instante que o TQ01 deu carga na UDA, o mixer de diesel enviou o resultado da mistura para o TQ11, e que ele vai, mais adiante no tempo, ser usado para entregar o item DIESEL1 no DT04.

Outro aspecto importante se refere à produção e entrega de GLP. Claramente o problema mais sério de alocação (pois não envolve enquadramento de propriedades) existente neste cenário, este problema é abordado com eficiência e a solução ótima é encontrada para atender à demanda com o menor número de trocas possível. É fácil perceber isto pois, como a esfera EF02 tem apenas  $1.500\text{m}^3$  disponíveis, e a EF01 está praticamente vazia (só com o lastro), a EF02 tem que atender ao máximo possível da demanda inicialmente. Mas, ao contrário da situação da Nafta ou do Querosene, o estoque atual não é suficiente para atender a demanda, então o algoritmo, mais uma vez, encontra o melhor caminho para a solução deste problema. Ele aloca o quanto pode à EF02 até que esta não possa mais atender a demanda. Então a EF01 é alocada para atender tal demanda, tendo volume suficiente apenas para atender ao item GLP-4 (ao final desta transferência, fica com  $28\text{ m}^3$  de volume disponível). Então, novamente a EF02 passa a enviar, atendendo ao item GLP-5. Pela demanda contínua por GLP nas primeiras 20 horas do horizonte de programação, fica claro que não há outra forma de se atender a esta demanda com tão poucas trocas de armazenamento.

Os tanques TQ14 e TQ22 não são utilizados pois não há campanha para produção de diluente (qcap). Da mesma forma o duto OL01 não é usado, pois não há itens de recebimento (crus comprados).

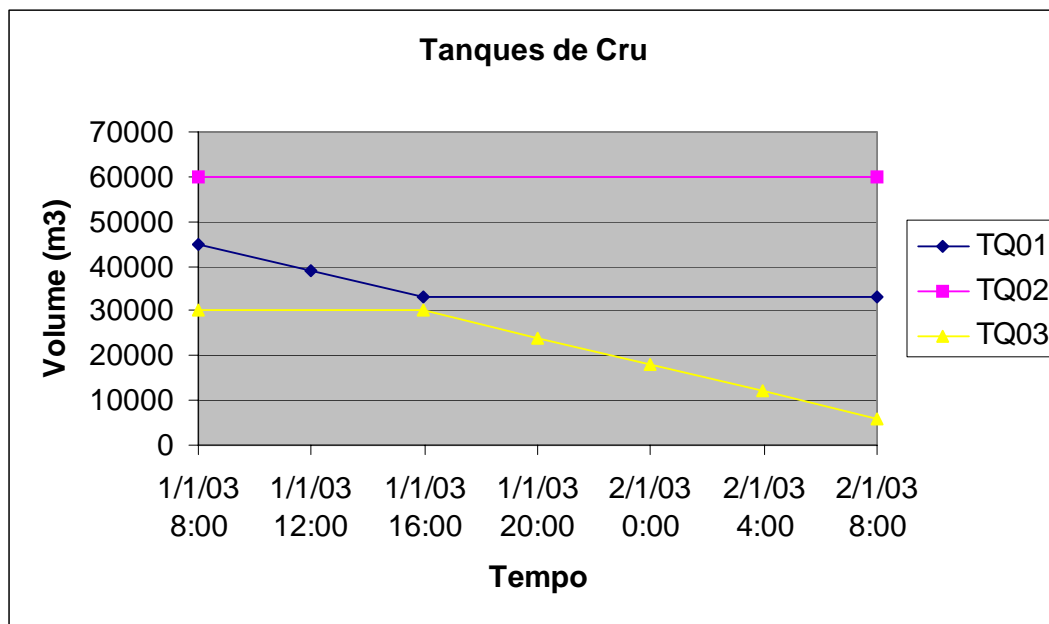


Figura 38 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Cru (Cenário 1).

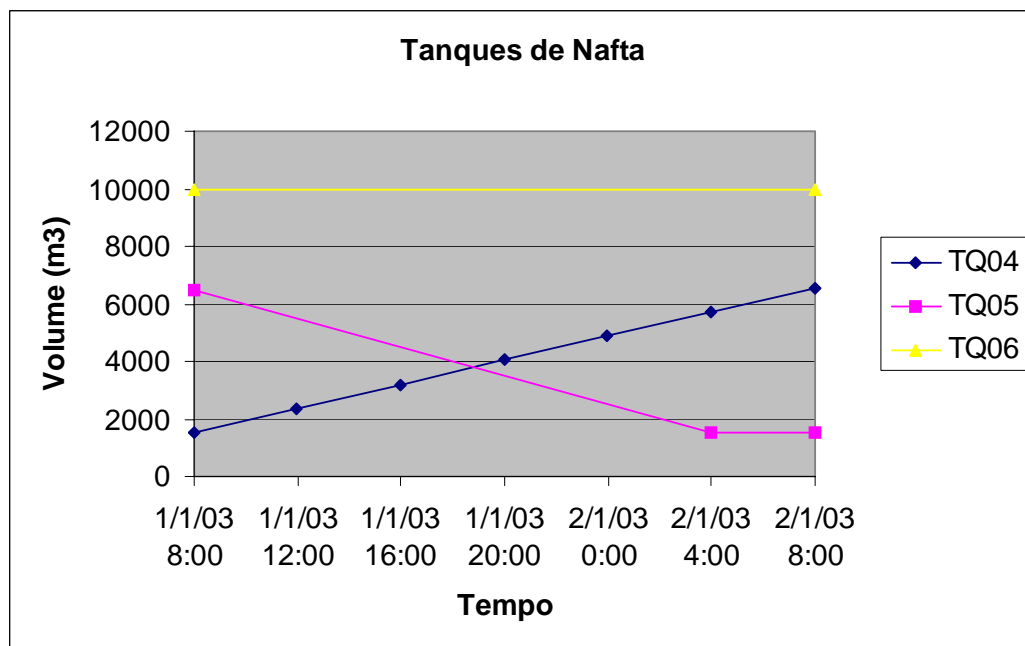


Figura 39 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Nafta (Cenário 1).

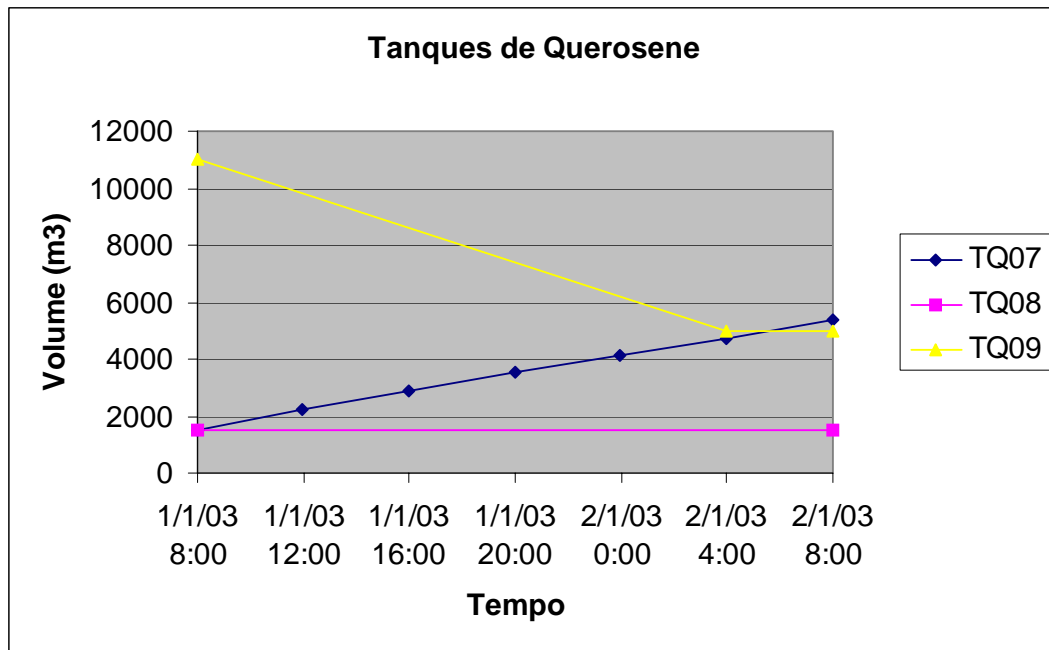


Figura 40 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Querosene (Cenário 1).

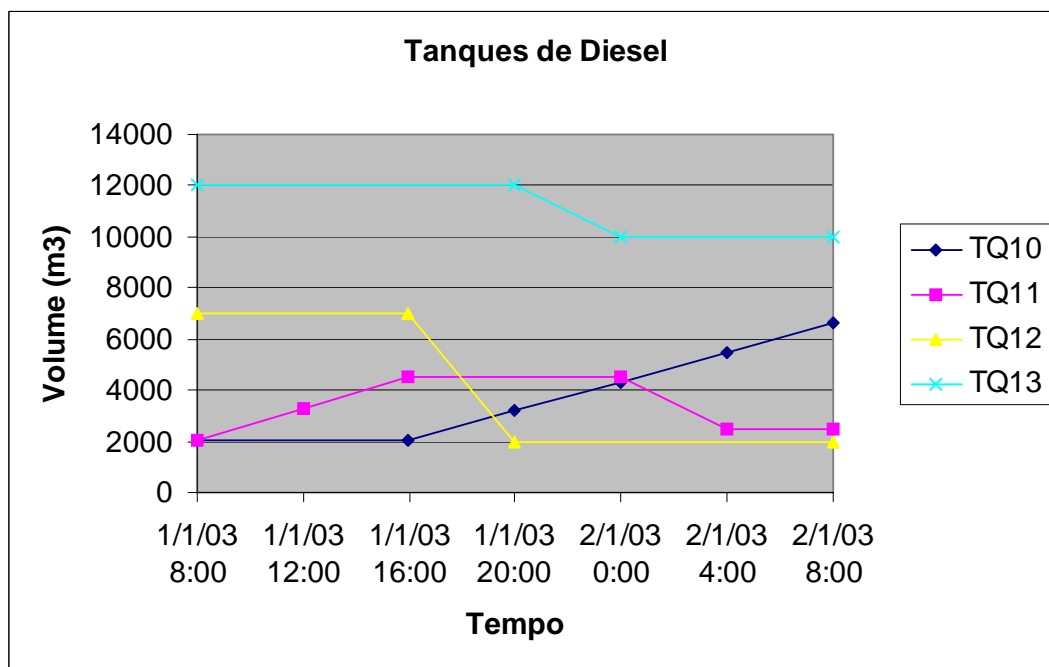


Figura 41 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Diesel (Cenário 1).

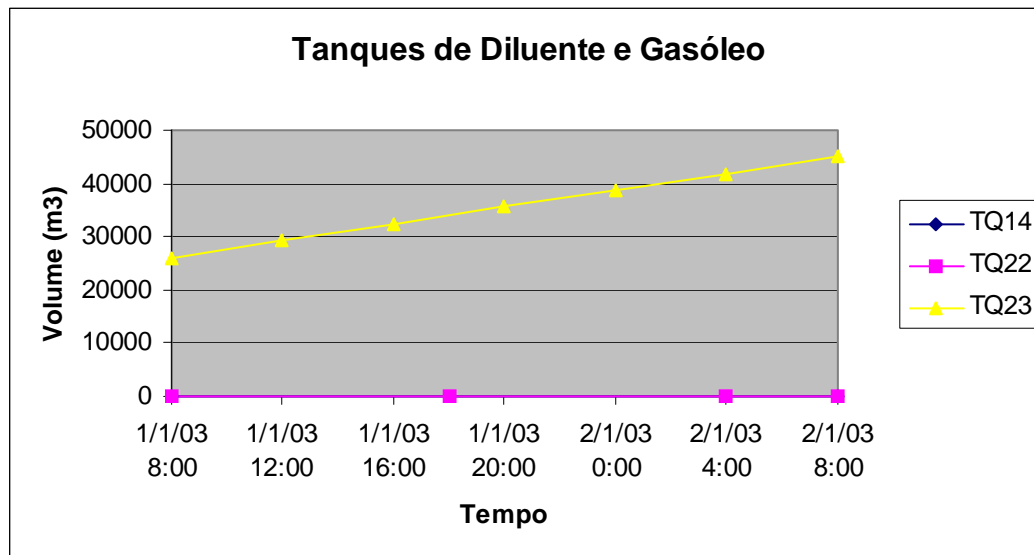


Figura 42 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Gasóleo e Diluente (Cenário 1).

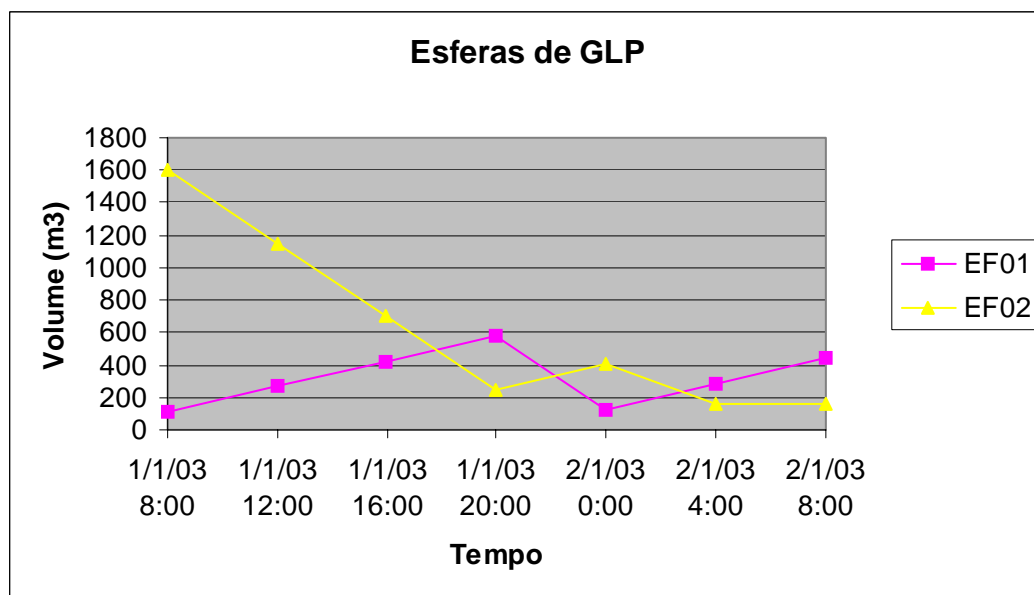


Figura 43 – Gráfico de Volumes nas Esferas de GLP (Cenário 1).

Acompanhando-se os gráficos de volume deste cenário, é possível perceber que as restrições operacionais de volume suficiente para enviar ou capacidade disponível para receber foram sempre respeitadas, de acordo com os limites apresentados na tabela 5-1.

A seguir são apresentados alguns gráficos com a variação das propriedades dos produtos nos estoques da refinaria ao longo do horizonte de programação. Como o maior problema de provável desvio de especificação acontece nos

tanques de diesel, como já foi mencionado anteriormente, estes tanques e suas propriedades são mostrados abaixo.

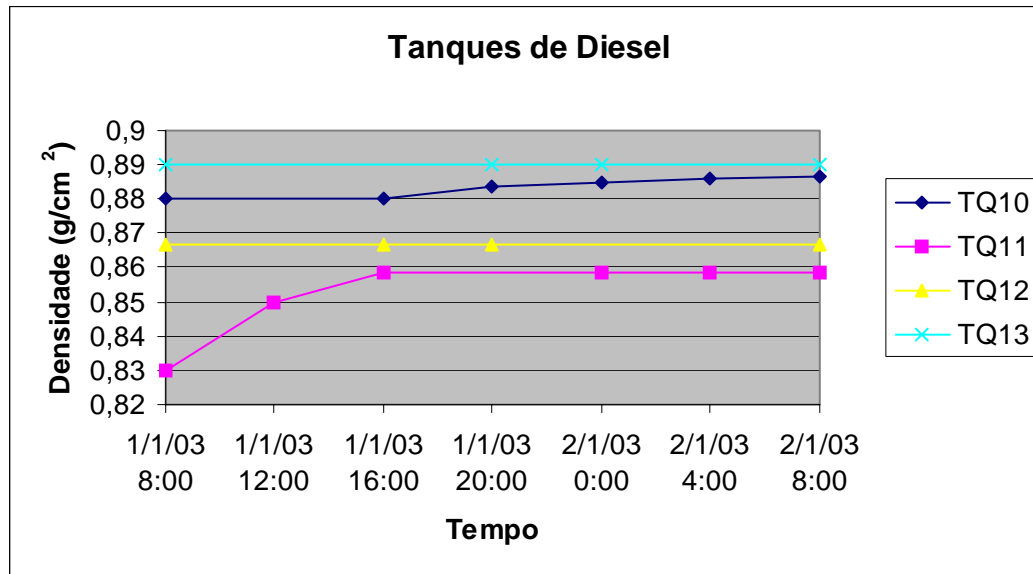


Figura 44 – Gráfico de densidade nos tanques de diesel (Cenário 1).

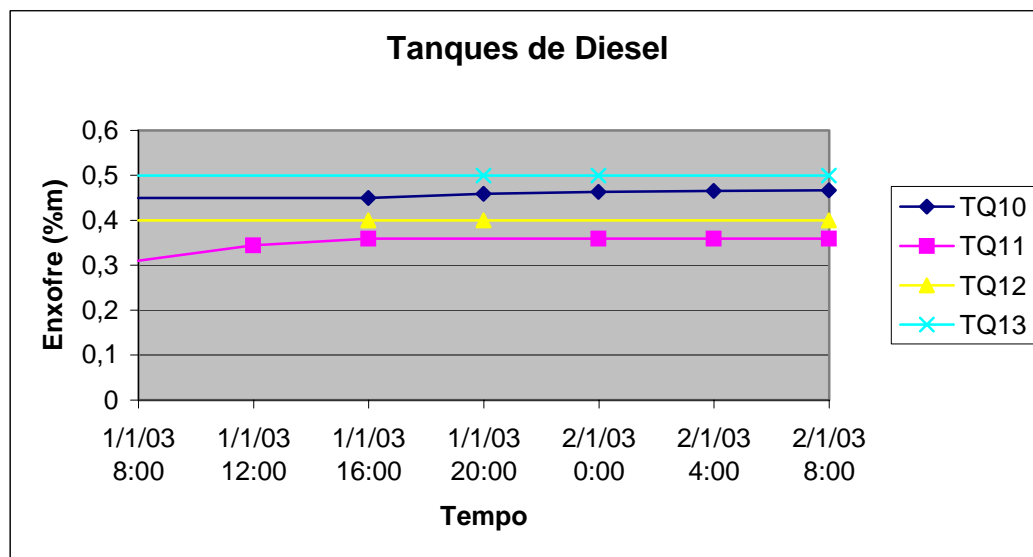


Figura 45 – Gráfico de enxofre nos tanques de diesel (Cenário 1).

Olhando estes gráficos de propriedades, é possível perceber que somente o tanque TQ11 tem possibilidade de atender à demanda por “Diesel 1” neste cenário, pois todos os outros apresentam desvio de especificação para tal produto.

Analisando os rendimentos e propriedades das frações resultantes de cada campanha para cada carga, é possível ver que em longo prazo é impossível manter as propriedades do diesel para atender a demandas futuras de “Diesel 1”, se utilizando somente a campanha normal, já que nesta campanha não há mistura de



querosene no diesel (única forma de baixar a densidade e enxofre do diesel, tendo em vista os rendimentos dos petróleos disponíveis).

### 5.4.2.2. A Programação do Cenário 2.

A seguir veremos a programação gerada para o cenário 2.

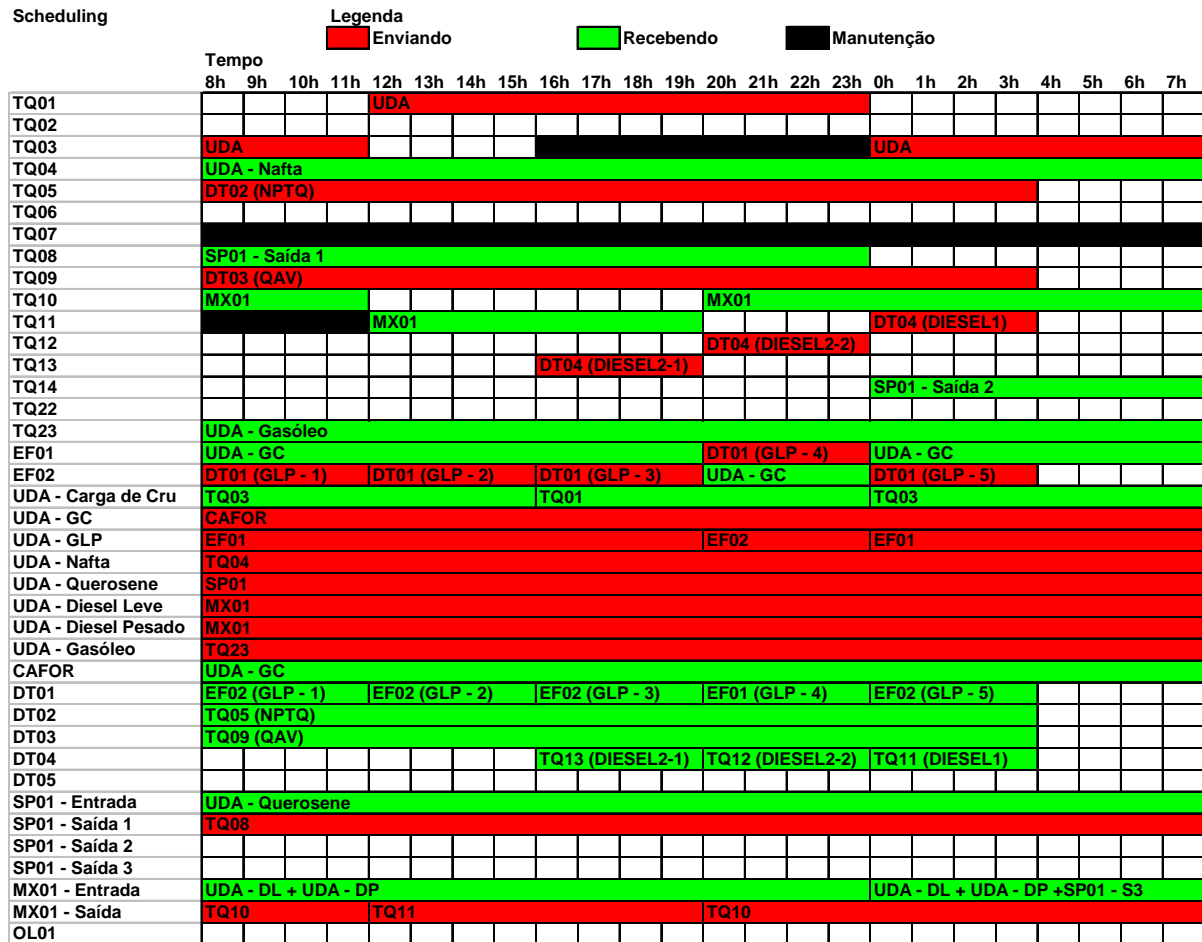


Figura 46 – Gráfico de Gantt com toda a programação (Cenário 2).

A primeira diferença que fica clara nesta programação é a existência de manutenção (Barras cinzas). As atividades de manutenção são programadas conforme planejadas anteriormente (Figura 18), e representam uma restrição de disponibilidade de um equipamento por um determinado período. Como já havia sido dito anteriormente estas atividades de manutenção foram escolhidas proposadamente para criar dificuldades para o algoritmo resolver o problema de alocação de recursos, já que:

1. O tanque TQ03 tem o petróleo mais barato, e ele é sempre escolhido para dar carga na UDA a maior parte do tempo;
2. O TQ07 foi escolhido no cenário 1, e deve ficar claro que tanto ele quanto o TQ08 poderiam ter sido escolhidos, então o TQ07 foi bloqueado por todo o cenário;
3. O TQ11 é o único que pode atender o item de “Diesel 1” sem desvio, e o diesel tem que ser analisado por 4 horas antes de ser enviado para fora da refinaria, então só resta ao algoritmo alocar este tanque para receber o diesel mais leve possível (TQ01 dando carga na UDA) no único período que lhe resta (12 – 20 h).

Outro aspecto claro nesta programação é a mudança de campanha. A campanha Qcap é utilizada nas últimas 8 horas do horizonte de programação e é fácil ver isso porque os tanques de querosene param de receber, e os tanques de diluente passam a receber produto. O misturador de diesel (MX01) também recebe parte da vazão do diluente, que serve para tornar o diesel menos pesado.

É possível ver que todas as restrições são respeitadas e tem-se um *scheduling* ótimo para a função objetivo utilizada. À primeira vista pode parecer que se economizaria com matéria prima se, ao invés de continuar dando carga na UDA do TQ01 na segunda metade da manutenção de TQ03 (20 – 0h), o algoritmo usasse o TQ02. Mas acontece que a penalidade por se fazer mais trocas de tanques neste caso é bem superior que a diferença de custo das misturas de petróleo dos tanques TQ01 e TQ02 (preço da composição multiplicado pelo volume transferido), que torna esta opção desvantajosa.

A variação dos volumes resultante desta programação pode ser vista logo a seguir.

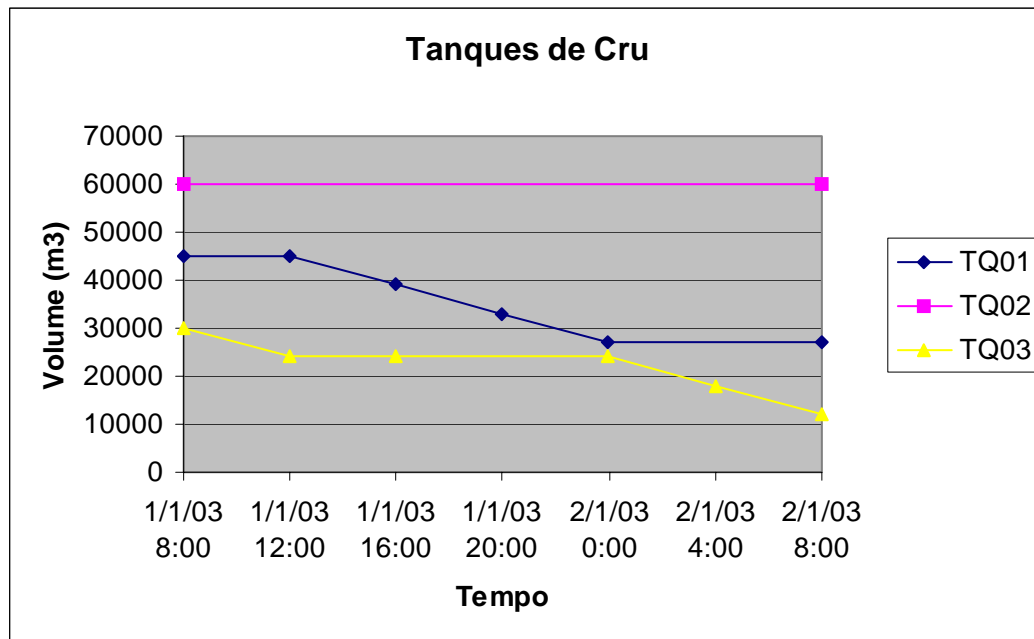


Figura 47 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Cru (Cenário 2).

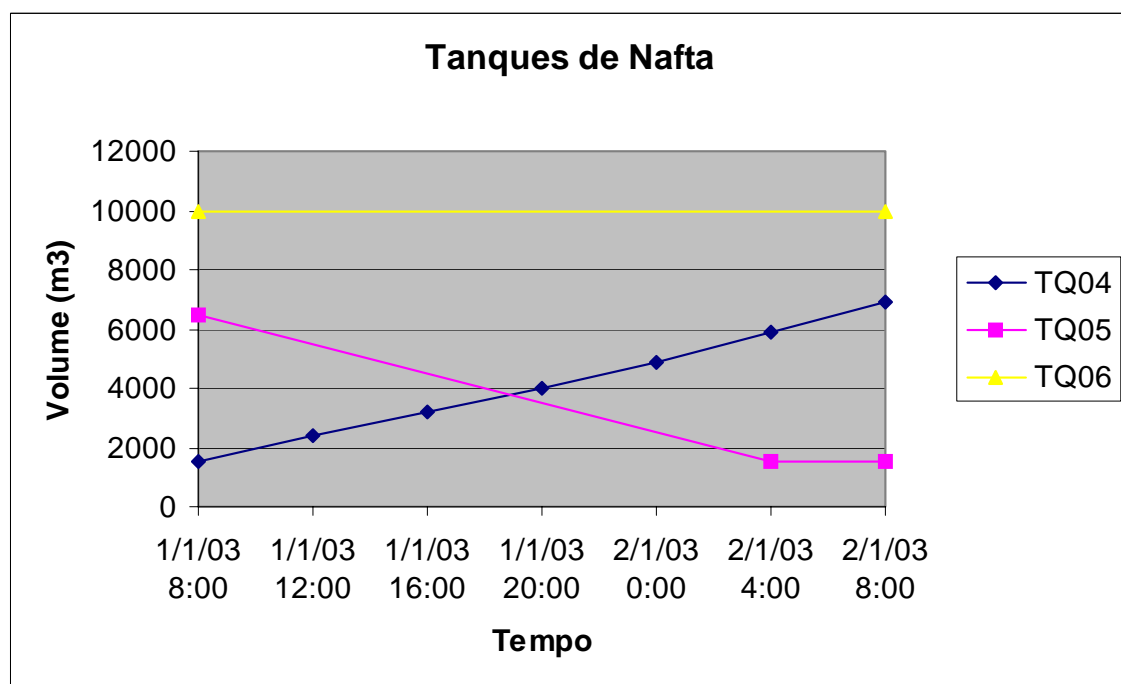


Figura 48 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Nafta (Cenário 2).

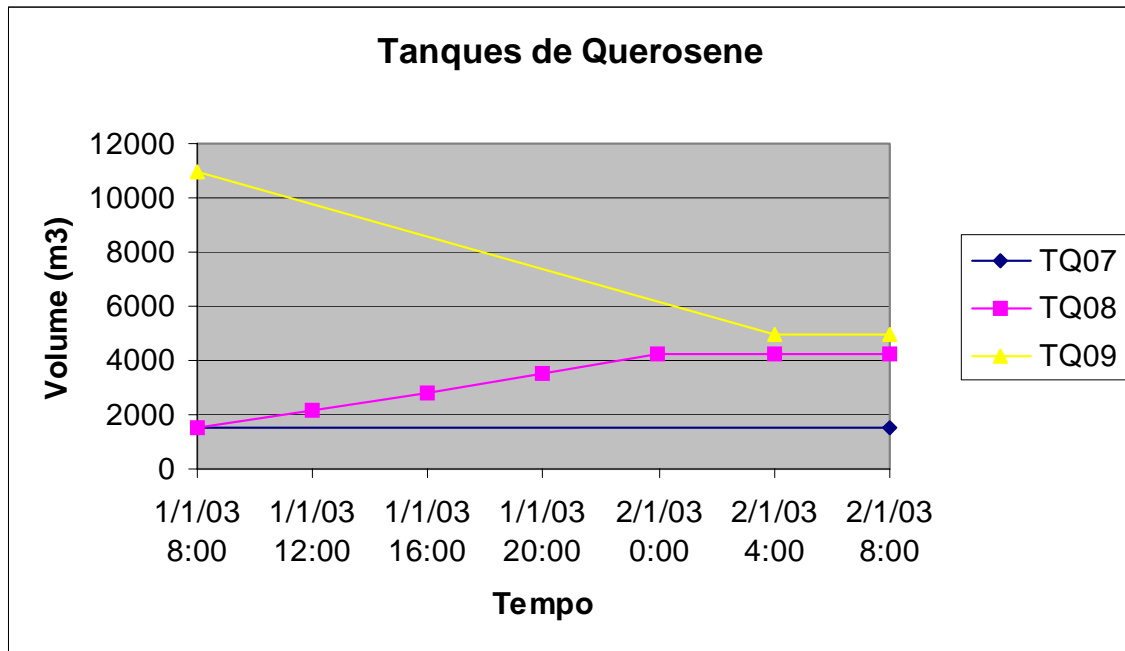


Figura 49 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Querosene (Cenário 2).

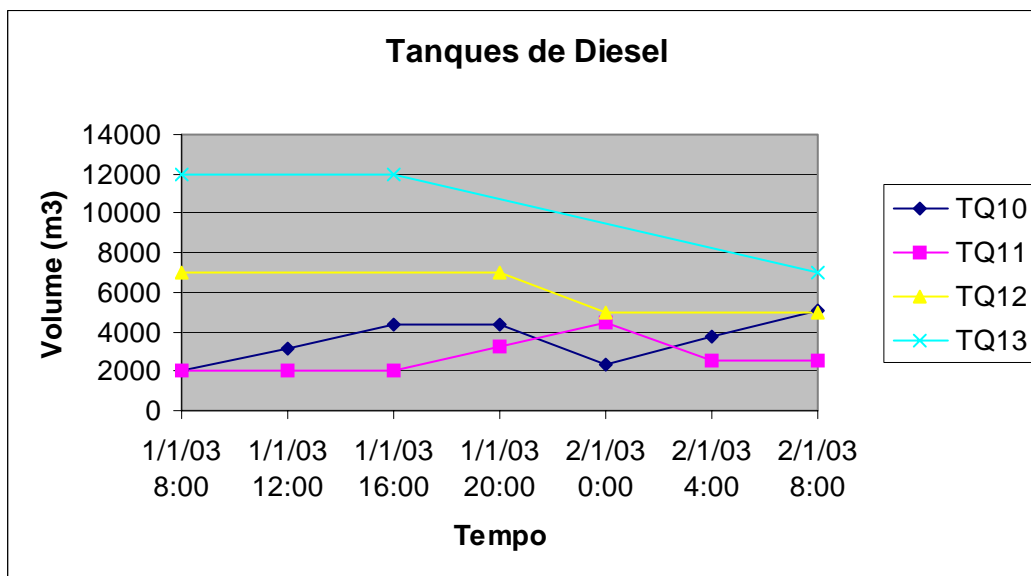


Figura 50 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Diesel (Cenário 2).

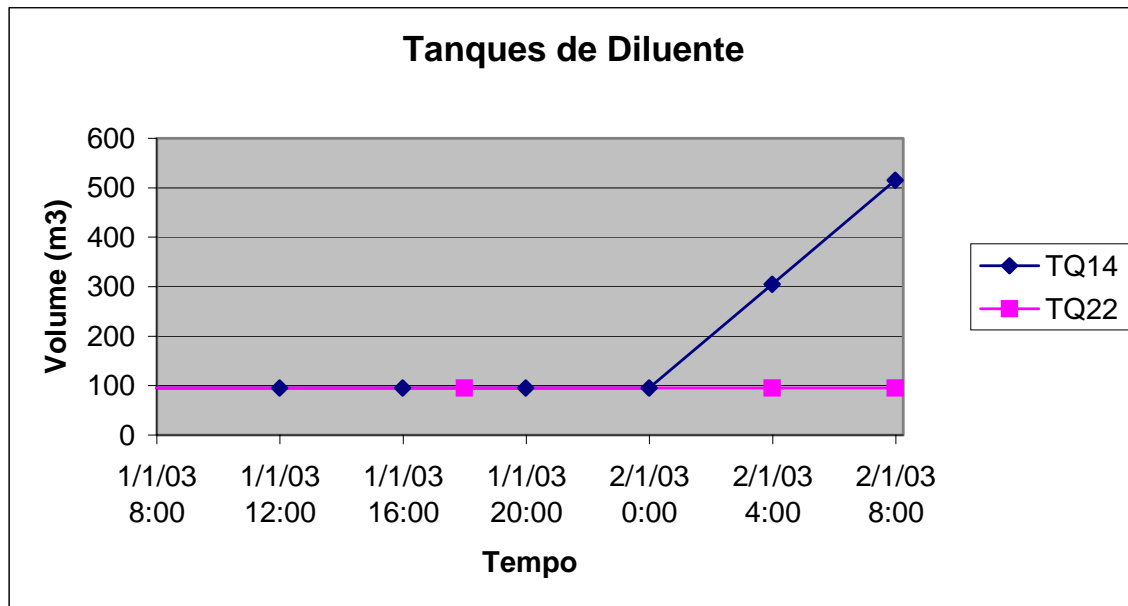


Figura 51 – Gráfico de Volumes nos Tanques de Diluente (Cenário 2).

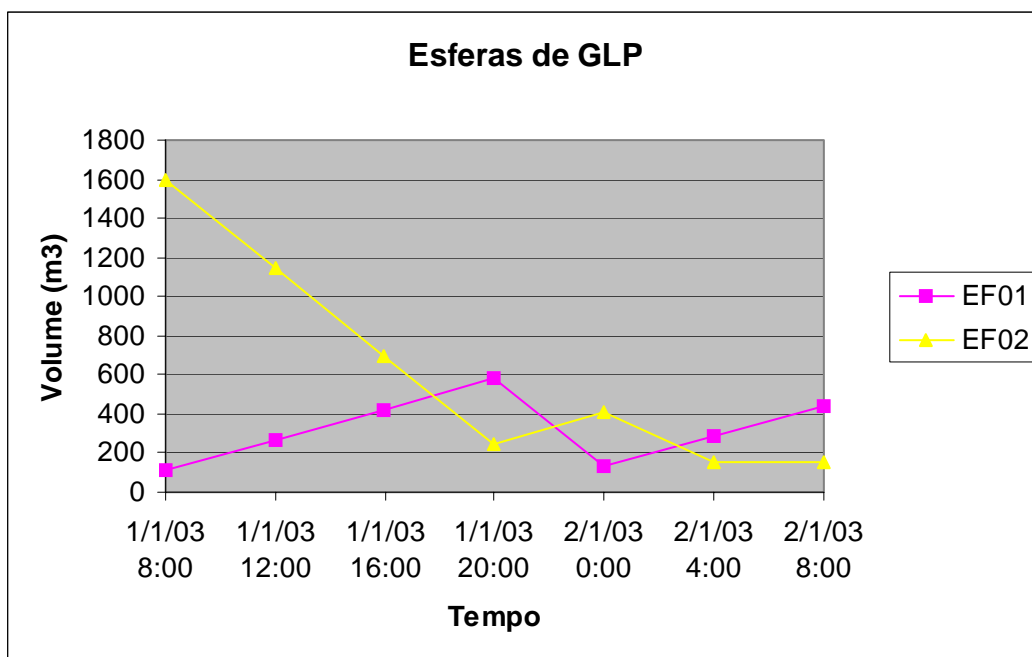


Figura 52 – Gráfico de Volumes nas Esferas de GLP (Cenário 2).

Os gráficos de volume deixam claro, mais uma vez, que as restrições de volume estão sendo respeitadas, e que as manutenções e a troca de campanha realmente foram levadas em conta pelo algoritmo.

A seguir serão apresentados os gráficos de propriedades para os tanques de diesel, que são os que mais sofrem variação e que são mais difíceis de especificar

para atender os itens deste cenário (cenário 2), a exemplo do que aconteceu com o cenário anterior (cenário 1).

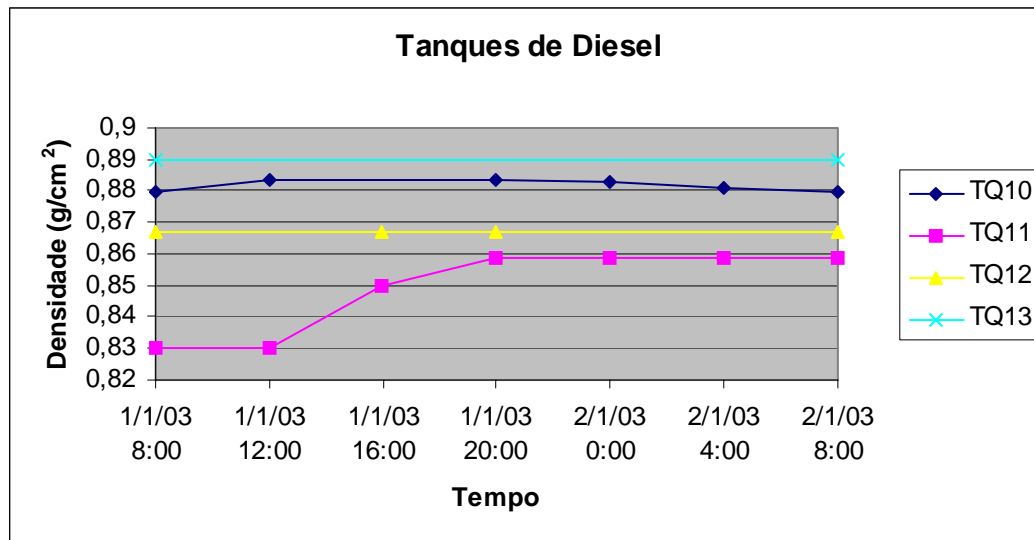


Figura 53 – Gráfico de densidade nos tanques de diesel (Cenário 1).

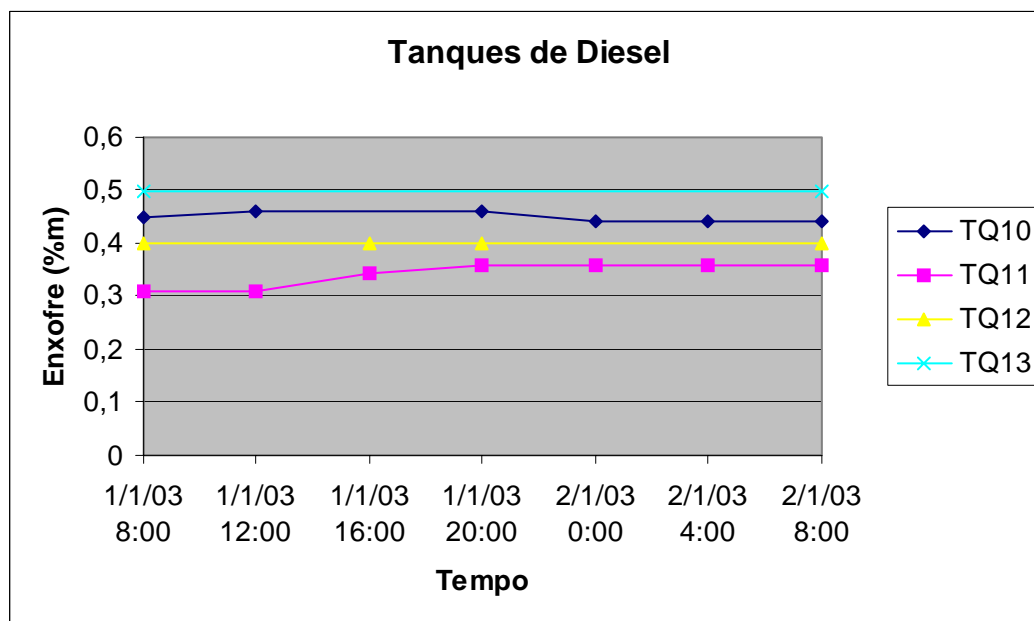


Figura 54 – Gráfico de enxofre nos tanques de diesel (Cenário 1).

Não é necessário destacar mais uma vez sobre a especificação do TQ11 para enviar “Diesel 1”, pois isto já foi feito para o outro cenário. Cabe mostrar aqui como a troca de campanha (de Normal para Qcap, que vai de 2/1 a 0h até 2/1 às 8h) e a carga da UDA com TQ01 (1/1 às 20h até 2/1 a 0h) afetam o diesel do TQ10 diminuindo sua densidade e seu teor de enxofre.